



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

JISKROVĚ BEZPEČNÝ ANALYZÁTOR VEDENÍ

INTRINSICALLY SAFE LINE ANALYZER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Wurzel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Tomáš Wurzel

ID: 147002

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Jiskrově bezpečný analyzátor vedení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je návrh a realizace tří měřicích modulů s mikrokontrolérem. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Nastudujte problematiku jiskrově bezpečných zařízení, vypracujte přehled komerčně dostupných modulů s obdobnou požadovanou funkcí.
- 2) Navrhněte a realizujte moduly pro měření teploty pomocí pozistoru, pro měření izolačního stavu vedení a pro měření celistvosti vodiče.
- 3) Vstupy a výstupy musí splňovat požadavky pro jiskrovou bezpečnost Ex ia. Každý z modulů by měl být schopen odesílat výsledek svého měření pomocí jednosměrné komunikace nadřazenému systému.
- 4) Moduly realizujte, otestujte jejich vlastnosti a na základě výsledků případně navrhněte další možnosti rozšíření funkčnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ČSN EN 50014 Všeobecné požadavky na nevýbušná zařízení

ČSN EN 50020 Jiskrově bezpečná zařízení.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 16.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem jiskrově bezpečného analyzátoru vedení. Popisuje zařízení složené ze tří měřicích modulů a komunikační části. Zabývá se měřením stavů pozistoru, izolačního stavu IT sítě a celistvosti vedení ve výbušném prostředí. Práce popisuje principy jiskrové bezpečnosti a požadavky na parametry zařízení z hlediska norem. Funkce zařízení je vysvětlena na blokovém schématu. Realizace zařízení je popsána postupně podle bloků schématu. Práce se dále zabývá návrhem elektrického schéma, desky plošných spojů a výběrem vhodných komponent. Předmětem pozdějších kapitol je vývoj testovacího softwaru a technická realizace produkčního vzorku. V posledních částech se práce věnuje zprovoznění a ověření funkčnosti hotového zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Jiskrová bezpečnost, jiskrově bezpečná zařízení, pozistor, izolační stav, celistvost, I²C

ABSTRACT

The main goal of this thesis is to design intrinsically safe line analyzer. Thesis describes a device that consists of three measuring circuits and a communication circuit. The device is required to measure posistor resistance, isolation state of power cable and line continuity in potentially explosive areas. Document describes basic requirements of ATEX directive matching standards that are related to device.

The function of each logical part of the device is described with help of block diagram. After the basic function description an electrical schematic design and component selection is discussed. After this a printed circuit board design follows. Another part of the thesis describes testing software development. At the end of the document the device is assembler and its basic function is verified.

KEYWORDS

Intrinsic safety, intrinsically safe equipment, posistor, isolation state, continuity, I²C

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WURZEL, T. *Jiskrově bezpečný analyzátor vedení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 82 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval své rodině za podporu a zajištění vhodných podmínek pro studium. Nemohu opomenout svého kolegu Radima Vaška za účinné rady a pomoc při vypracování práce a Davida Pamánka za ochotu a trpělivost při studiu. Dále bych rád poděkoval vedoucímu práce, docentu Benešovi, za pozitivní přístup. V neposlední řadě bych rád poděkoval společnosti T Machinery a.s. za předložení zadání diplomové práce a zejména panu Macuchovi za velmi přínosné odborné vedení. Stejně tak děkuji společnosti MM Group, s.r.o. za poskytnutí technického zázemí a poradenství.

OBSAH

Obsah	6
1 Úvod.....	8
2 Popis zařízení	10
2.1 Cílová aplikace.....	10
2.2 Požadavky zadavatele	10
3 Teoretické podklady	12
3.1 Výbušná prostředí a nevýbušná zařízení.....	12
3.1.1 Jiskrová bezpečnost	14
3.1.2 Návazná zařízení.....	14
3.2 Termistory	15
3.3 Spínané zdroje.....	16
3.3.1 Zdroje s akumulací energie – typ FLYBACK	16
3.4 Frekvenční filtry.....	17
3.4.1 Základní teorie	17
3.4.2 Aproximace přenosových charakteristik	18
3.4.3 Pasivní filtr druhého řádu	20
3.4.4 Aktivní filtr	21
3.5 Sériová komunikace	22
3.5.1 Rozhraní UART	22
3.5.2 Sběrnice I ² C	23
3.5.3 Sběrnice CAN	25
3.6 Použité mikrokontroléry.....	28
3.6.1 Mikrokontroléry MC9S08PT16.....	28
3.6.2 Mikrokontroléry MCF51JM64	29
3.7 Vývojové prostředí CodeWarrior 10.6.4.....	29
3.7.1 Vývojový systém Processor Expert	30
4 Návrh zařízení.....	33
4.1 Hlavní blokové schéma	33
4.2 Měření stavu pozistoru	34
4.2.1 Blokové schéma	35
4.2.2 Elektrické schéma	36
4.3 Měření izolačního stavu v IT síti	39
4.3.1 Blokové schéma	39
4.3.2 Elektrické schéma	40
4.4 Měření celistvosti vedení	43
4.4.1 Blokové schéma	43
4.4.2 Elektrické schéma	45
4.5 Komunikační část.....	48

4.5.1	Blokové schéma.....	48
4.5.2	Elektrické schéma	49
4.6	Napájecí zdroj	52
4.6.1	Elektrické schéma	53
5	Softwarové řešení	54
5.1	Popis funkce programů	54
5.2	Program modulu pro měření pozistoru	55
5.2.1	Konfigurace mikrokontroléru	55
5.2.2	Knihovna adc.h	55
5.2.3	Knihovna led_signal.h	56
5.2.4	Knihovna uart_pe.h.....	56
5.2.5	Hlavní smyčka programu - program.h.....	56
5.3	Program modulu pro měření izolačního stavu	56
5.3.1	Knihovna adc.h	57
5.4	Program modulu pro měření celistvosti	57
5.4.1	Knihovna adc.h	57
5.4.2	Knihovna sine.h	57
5.5	Program řídicího mikrokontroléru	58
5.5.1	Knihovna iic_cf.h.....	58
5.5.2	Knihovna uart_pe.h.....	59
6	Označení a parametry	60
6.1	Stanovení maximálních parametrů.....	60
6.1.1	Výstupní parametry obvodu pro měření pozistoru	60
6.1.2	Parametry obvodu pro měření izolačního stavu	61
6.2	Odvození vzorců dle směrnice ATEX	62
7	Realizace zařízení	64
7.1	Výběr krabičky.....	64
7.2	Návrh desky plošných spojů	64
7.2.1	Izolační vzdálenosti pro jiskrovou bezpečnost	65
7.2.2	Konkrétní příklady konstrukčních řešení.....	67
7.3	Návrh štítků.....	69
7.4	Fotografie výrobku.....	70
8	Ověření funkčnosti.....	72
8.1	Modul pro měření pozistoru.....	72
8.2	Modul pro měření izolačního stavu.....	73
8.3	Modul pro měření celistvosti	73
9	Závěr	74
10	Zdroje.....	75
	Seznam zkratk a symbolů	77
	Seznam příloh	78

1 ÚVOD

Jedním z nejstarších odvětví průmyslu je těžba uhlí. Za dobu své existence toto odvětví vyspělo od čistě ručního dobývání do stádia, kdy je tento proces mechanizován a zcela závislý na elektrických zařízeních a automatizaci. Dobývání uhlí dnes zajišťují kombajny ve spojení s dalšími mechanickými stroji, jako jsou například dopravníky nebo mechanizované výztuže. Tyto stroje jsou využívány k vytváření velkých dobývacích komplexů. Jedněmi z hlavních priorit při dobývání uhlí jsou efektivita, spolehlivost a ochrana zdraví a životů pracovníků.

Předmětem této práce je podrobný popis návrhu zařízení, které má primárně sloužit k monitorování určitých provozních parametrů v procesu dobývání uhlí v hlubinných dolech. Tím má příznivě ovlivnit spolehlivost a bezpečnost provozu.

Veškerá prodávaná elektrická zařízení jsou zatížena požadavkem na dodržení bezpečnostních norem. Elektrická zařízení, jejichž obvody jsou ve styku s výbušným prostředím, musí navíc splňovat normy pro takzvaná nevýbušná zařízení. Tyto normy stanovují požadavky na parametry daného zařízení tak, aby vlivem jeho poruchy nemohlo dojít k iniciaci výbuchu. Výbušná prostředí jsou taková, kde vlivem přítomnosti plynů nebo prachů hrozí nebezpečí výbuchu. Prostory hlubinných dolů jsou tedy výbušným prostředím z důvodu možné přítomnosti uhelného prachu, metanu a jiných podzemních plynů. Proto při návrhu předmětného zařízení musím vycházet také z norem pro nevýbušná zařízení.

Zadání této práce bylo předloženo externí firmou, která požaduje návrh zařízení slučujícího funkci několika jiných, doposud používaných zařízení. Primárními funkcemi by mělo být měření tří stavů pozistoru umístěného v některém ze strojů dobývajících uhlí, měření izolačního stavu silového vedení v dole a měření celistvosti vedení. Měření pozistoru se využívá pro hlídání kritické teploty některé z komponent stroje, či vinutí elektromotoru. Hlídání izolačního stavu až třífázové IT sítě je důležité pro plánování oprav a spolehlivost. Měření celistvosti vedení je pak důležité pro hlídání správného uzemnění jednotlivých zařízení a například také pro jednoduché ovládání, je tedy opět důležité pro spolehlivost provozu. Každé z těchto měření bude zajištěno samostatným, galvanicky odděleným, modulem uvnitř zařízení.

Z tohoto důvodu bude každý modul vybaven vlastním mikrokontrolérem. Naměřená data z každého modulu budou přenesena do komunikační části zařízení, kde v budouce budou vyhodnocena a v budoucnu odeslána nadřazenému systému po sběrnici CAN. Samotné zařízení bude umístěno mimo výbušnou zónu nebo v pevném závěru. Firma požaduje použití mikrokontrolérů, se kterými běžně pracuje. Zařízení by mělo být umístěno v běžně používané krabici s úchytem na lištu DIN 35.

Cílem práce je tedy návrh metod jednotlivých měření, vytvoření elektrického schéma, návrh desky plošných spojů, vytvoření softwaru pro jednotlivé měřicí moduly a realizace zařízení.

Začátek této práce se bude věnovat popisu aplikace zařízení, vymezení souvisejících pojmů, rozboru souvisejících norem a zařazení výrobku z těchto hledisek. Dále bude předloženo blokové schéma zařízení, na kterém bude vysvětlena jeho funkce a vnitřní struktura. Jednotlivé bloky schématu pak budou podrobně rozebrány v samostatných kapitolách.

Pro každý blok zařízení bude prezentována související část elektrotechnického schématu a bude objasněn postup jejich návrhu. V těchto kapitolách bude také vysvětlen výběr součástí a výpočet jejich parametrů.

Pozdější kapitoly se budou věnovat návrhu softwaru pro jednotlivé měřicí moduly a ověření jejich funkce. Na závěr bude zkompletováno schéma a navržena deska plošných spojů. Zařízení bude sestaveno a bude ověřena jeho celková funkčnost.

Při návrhu budu vycházet z technických norem, odborné literatury a z konzultací se zadavatelem.

2 POPIS ZAŘÍZENÍ

V této kapitole se pokusím popsat cílovou aplikaci zařízení a z toho plynoucí požadavky zadavatele. V rámci diplomové práce je mým úkolem realizace a ověření funkčnosti zařízení připraveného pro implementaci požadovaných funkcí.

2.1 Cílová aplikace

Zařízení by mělo být součástí různých funkčních celků. Pro každou aplikaci platí, že jeho výstupy budou v kontaktu s prostory s nebezpečím výbuchu, přičemž samotné zařízení bude umístěno buďto mimo toto prostředí nebo bude nainstalováno do takzvaného pevného závěru umístěného do tohoto prostředí.

V jednom z možných zapojení může být zařízení použito pro hlídání izolačního stavu silového vedení motoru, teploty komponenty motoru (například ložiska) a ovládacího obvodu uzavřeného přes zemnicí vodič. Ovládání je realizováno zařazením rezistoru a diody v různém směru sériově do ovládací smyčky. Na základě vyhodnocených údajů pak může přerušit obvod pro spínání stykače a odesílat data do nadřazeného systému.

2.2 Požadavky zadavatele

Jak jsem již, zmínil, bude se jednat o zařízení složené z více částí. Zadavatel tedy požadavky stanovil následovně:

Společné

- Modul hlídání kabelového výstupu (pozistoru, celistvosti zemního vodiče a izolačního stavu)
- Plastová krabice Phoenix ME MAX 22,5 mm nebo ME MAX 45 mm (pro 2 desky)
- Napájení 20 V DC – 42 V AC +25%
- Otočný přepínač adresy 0-F
- Otočný přepínač funkce 0-F
- Čtení všech měřených absolutních veličin po komunikaci s periodou 100ms
- Indikace LED: napájení (GN), CAN (YE), vstup pozistor (GN), vstup celistvost (GN), vstup izolační stav (GN)
- Řídící mikrokontrolér Freescale MCF51JM64VLH
- 3x měřicí mikrokontrolér Freescale MC9S08PT16
- Provozní okolní teplota -20 °C - 80 °C
- Certifikát Atex, I M1 [Ex ia] I

Izolační stav

- Měření izolačního stavu 1 a 3fázové IT sítě bez napětí

- Měření izolačního odporu v rozsahu 1 k Ω - 10 M Ω , rozlišení 1 % měřené hodnoty
- měřící napětí 15 V DC, vnitřní odpor 100 k Ω

Pozistor

- Měření odporu pozistoru
- Vyhodnocení 3 mezních stavů (zkrat < 50R, dobrý stav < 1,6 k Ω , porucha > 3,6 k Ω) se zpožděním 1s
- Sledování trendu měřené hodnoty
- Měřící napětí 5 V DC, vnitřní odpor 10 k Ω

Celistvost

- Měření odporu zemního vodiče v rozsahu 0-100 Ω , rozlišením 0,1 Ω , detekce obou polarit diody
- Obě svorky vstupu zpětného hlášení mají rezistor vůči napájení a jsou odolné vůči zkratu na obě napájecí svorky
- Měřící napětí 10 V AC, vnitřní odpor 1 k Ω

Zapojení svorek

- 1, 2 napájení
- 3, 4 CAN (CAN L, CAN H)
- 5, 6 spínací kontakt relé (250VAC/6A)
- 7, 8 vstup zpětného hlášení stykače, aktivní vstup napájený ze svorek 1,2 pro bezpotenciálový kontakt
- 9 společný vstup "země" pro měření izolačního odporu
- 10, 11, 12 3fázový vstup měření izolačního odporu, izolovaný Ex obvod
- 13, 14 vstup pozistoru, izolovaný Ex obvod
- 15, 16 vstup celistvosti, izolovaný Ex obvod

3 TEORETICKÉ PODKLADY

V této kapitole vysvětlím pojmy, postupy a teorii úzce související s problematikou této práce. V první části nejdříve objasním problematiku nevýbušných zařízení a jiskrové bezpečnosti. Dále se pokusím přiblížit některé z problémů návrhu spínaných zdrojů. Později se budu věnovat termistorům a zapojením s operačním zesilovačem a frekvenčním filtrům.

3.1 Výbušná prostředí a nevýbušná zařízení

Uvedu jen záležitosti úzce spjaté s navrhovaným zařízením. Další informace k této problematice lze dohledat v příslušných normách a literatuře uvedené na konci práce.

Prostory s nebezpečím výbuchu se vyznačují stálou nebo občasnou přítomností výbušné směsi. Nevýbušná jsou taková zařízení, která jsou navržena tak, aby vlivem provozních nebo poruchových stavů jejich částí nemohlo dojít ke vznícení výbušné atmosféry.

Prostředí s nebezpečím výbuchu se podle pravděpodobnosti výskytu výbušné atmosféry dělí do zón.

- **Zóna 0** – prostředí, kde se výbušná atmosféra tvořená **plynem, párou nebo aerosolem** nachází stále, dlouhou dobu nebo často. Většinou se jedná o prostory uvnitř technologických zařízení.
- **Zóna 1** – prostředí, kde se výbušná atmosféra tvořená plynem, párou nebo aerosolem nachází příležitostně.
- **Zóna 2** – prostředí, kde se výbušná atmosféra tvořená plynem, párou nebo aerosolem nachází výjimečně a po krátkou dobu.

Podobně tomu je pro prostředí s výbušnou atmosférou tvořenou hořlavým prachem. Tyto zóny jsou pak označeny jako **zóna 20, zóna 21 a zóna 22**.

Nevýbušná zařízení se dle právních předpisů (směrnice ATEX (2014/34/EU) a nařízení vlády č. 16/2016 Sb.) dělí několika skupin.

První skupina se týká zařízení pro doly, kde hrozí nebezpečí výbuchu metanu nebo uhelného prachu. Dělí se na kategorii M1 a M2. Zařízení kategorie M1 se na rozdíl od kategorie M2 v případě výskytu výbušné atmosféry nevypínají.

Druhá skupina se týká zařízení určených do ostatních prostředí s nebezpečím výbuchu. Dělí se na kategorie 1, 2 a 3. První kategorie zahrnuje zařízení „velmi vysokou úroveň ochrany před výbuchem“, ostatní kategorie zahrnují zařízení s nižšími stupni ochrany.

Kategorie dělí zařízení na základě úrovně bezpečnosti pro daná prostředí. Úroveň bezpečnosti zařízení se odvíjí od pravděpodobnosti, že se zařízení stane zdrojem iniciace výbuchu. Například kategorie 2 skupiny II vyžaduje, aby byla zajištěna ochrana i při běžných provozních poruchách nebo nepříznivých podmínkách. [2][16]

Na základě zařazení výrobku do daných skupin a kategorií se pak posuzuje vhodnost použití takového zařízení v jednotlivých zónách a prostředích.

Bezpečnost zařízení se zajišťuje použitím některého typu ochrany v různých úrovních. Stručný výpis těchto ochrany je v tabulce, kterou jsem převzal ze své předchozí práce.

Značka	Název	Stručný popis ochrany
d	Pevný závěr	V případě výbuchu uvnitř závěru nedojde k jeho přenesení ven do výbušného prostředí. Časté u majáků, rozvaděčových skříní, transformátorů atd.
e	Zajištěné provedení	Zabraňuje vnitřním a vnějším částem elektrického zařízení, aby se dostaly do nebezpečných stavů, které za normálního provozu nejsou přítomny. Například u Motorů, světel, rozvodných skříní
p	Závěr s vnitřním přetlakem	Uvnitř chráněných prostor je vytvářen přetlak trvalým průtokem nebo bez něj. Tím se zamezí vniku nebezpečné atmosféry do těchto prostor. Používá se u celých místností nebo u velkých zařízení.
i	Jiskrová bezpečnost	Tato zařízení jsou konstruována tak, aby u nich nedocházelo k jiskření a takovým tepelným účinkům, které by mohly zapálit výbušnou atmosféru. Využíváno u měřicí a regulační techniky.
o	Olejový závěr	Zařízení je ponořeno v oleji, tím je odděleno od výbušné atmosféry. Využíváno například u transformátorů nebo topných těles.
q	Pískový závěr	Závěr je zaplněn pískem o takové velikosti zrna, díky které se za provozních podmínek zamezí vznícení atmosféry od oblouku uvnitř závěru. Využíváno u transformátorů a elektrických zařízení.
m	Zalítí zalévací hmotou	Princip je zde podobný jako u olejového závěru, rozdíl je v tom, že se jedná o pevnou hmotu. Využití u snímačů nebo u malých elektronických zařízení.
n	Normální ochrana	Za normálního provozu nebo za definovaných podmínek neumožňuje vznícení výbušné atmosféry od zařízení. Používá se například u rozvodných skříní, motorů, světel a jiných zařízení.
s	Speciální závěr	Ochrana za provozních podmínek vyhoví konstrukčním a testovacím zkouškám daných certifikačním úřadem tak, aby byl bezpečný v nebezpečných prostorách. Například u detektorů plynů a svítidel.
op	Optické záření	Pro zabránění vznícení výbušné atmosféry musí být použity tři koncepce ochrany a) vyzařování s vlastní bezpečnou úrovní, typ „op is“ b) chráněné optické záření, typ „op pr“ c) optický systém s blokováním, typ „op sh“

Tabulka 1 - Shrnutí typů ochrany zařízení (převzato z [21])

3.1.1 Jiskrová bezpečnost

Jiskrová bezpečnost je jedním z typů ochran zařízení proti iniciaci výbuchu. Je založena na omezení energie, se kterou pracují obvody zařízení, na takovou úroveň, která nemůže zapálit výbušnou atmosféru. Jiskrově bezpečná zařízení nelze vždy chápat jako samostatná zařízení. Je nutno uvažovat s celým obvodem, jehož částí je dané zařízení. Mnohdy je zařízení rozděleno na zdroj a jiskrově bezpečný obvod. Zdroj umístěný v oblasti bez nebezpečí výbuchu může pracovat s nebezpečnými energiemi, avšak jeho výstupy musí být chráněny. V takovém případě mohou být spojeny s jiskrově bezpečným obvodem. Tímto způsobem lze zabránit průniku nebezpečných energií do výbušného prostředí.

V případě rozděleného zařízení se při posuzování jiskrové bezpečnosti se provádí rozbor a klasifikace poruch pouze z pohledu parametrů proudů a napětí vstupujících do jiskrově bezpečného obvodu. Například se posuzují izolační vzdálenosti.

V případě jiskrově bezpečného zařízení, které je celé umístěno ve výbušné atmosféře se kromě rozboru a klasifikace poruch analyzují všechny části obvodu i z hlediska možného zapálení vlivem tepla a jiskření. Dále se analyzuje konstrukce zařízení z hlediska dosaženého krytí a mechanického provedení.

Vzhledem k tomu, že jiskrově bezpečná zařízení musí mít zajištěnou bezpečnost i při poruchách, jsou definovány *bezporuchové* a *poruchové* prvky. Dále jsou definovány typy poruch. Ty mohou být *započitatelné* nebo *nezapočitatelné*. Poruchy započitatelné jsou takové, které vzniknou vlivem poruchy na *bezporuchovém prvku*, ostatní poruchy se považují za *nezapočitatelné*.

Jiskrová bezpečnost je dále rozdělena na základě úrovně bezpečnosti na:

- **úroveň ia** – obvod není schopen zapálit výbušnou atmosféru ani při dvou započitatelných poruchách a těch nezapočitatelných poruchách, které vytvoří nejméně příznivé podmínky
- **úroveň ib** - obvod není schopen zapálit výbušnou atmosféru ani při jedné započitatelné poruše a těch nezapočitatelných poruchách, které vytvoří nejméně příznivé podmínky
- **úroveň ic** - obvod není schopen zapálit výbušnou atmosféru v normálním provozním stavu [16]

3.1.2 Návazná zařízení

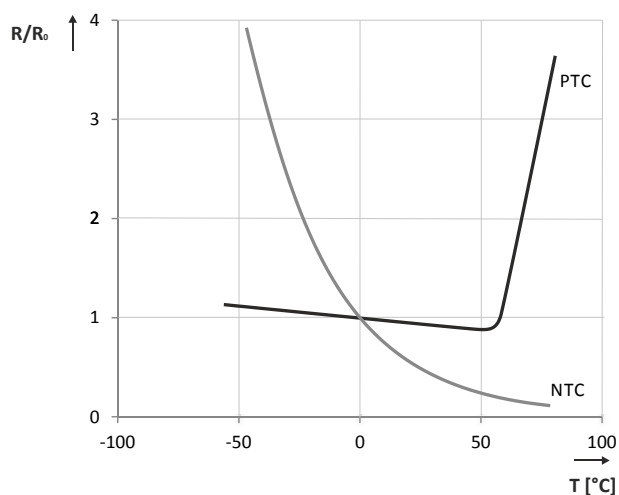
Jedná se o zařízení, která obsahují nebezpečné i jiskrově bezpečné obvody. Jsou konstruována tak, aby obvody, které nejsou jiskrově bezpečné, nemohly ovlivnit funkci jiskrově bezpečných obvodů. [3]

3.2 Termistory

Termistory jsou z obecného hlediska součástky, jež mění svůj elektrický odpor v závislosti na jejich teplotě. Ta může být ovlivněna buďto vnějšími vlivy nebo také vlastním ohřevem Jouleovým teplem.

Existují dva základní typy těchto součástek. Jsou rozděleny podle koeficientu, podle kterého mění svůj odpor s teplotou. Termistory se záporným koeficientem jsou označovány zkratkou NTC (Negative Temperature Coefficient) nebo též pojmem negastory. Obdobně je tomu u termistorů s kladným koeficientem, které jsou nazývány PTC (Positive Temperature Coefficient) respektive pozistory.

Pro termistory je typická nelinearita jejich závislosti na teplotě na velkém rozsahu. To je také největší nevýhodou termistorů, nicméně v některých aplikacích se této nelinearity účelně využívá. Typické průběhy závislosti odporu vztaženému k nulové teplotě jsou vyznačeny v grafu.



Graf 1 - Porovnání teplotní závislosti pozistoru a negastoru

Za povšimnutí stojí především charakteristika pozistoru, která se v části rozsahu prudce mění. Právě tohoto prudkého zlomu využívají některé aplikace. Jedná se například nadproudové ochrany (takzvané vratné pojistky).

Termistor, který je zařazen sériově v obvodu, se při normálním provozu neuplatní. V případě překročení požadovaného proudu se však pozistor vlivem Jouleova tepla dostane za zlom na charakteristice a rapidně zvýší svůj elektrický odpor. Tím omezí proud na přípustnou hodnotu.

Termistory jsou také využívány pro zpomalení náběhu elektrických zařízení, snímání hladiny, regulaci otáček ventilátorů anebo k měření teploty.

Předmětem této práce je návrh zařízení, které bude měřit teplotu strojní komponenty právě pomocí pozistoru. Pozistor je zvolen pro jeho miniaturní rozměry a větší mechanickou odolnost oproti běžným kovovým senzorům.

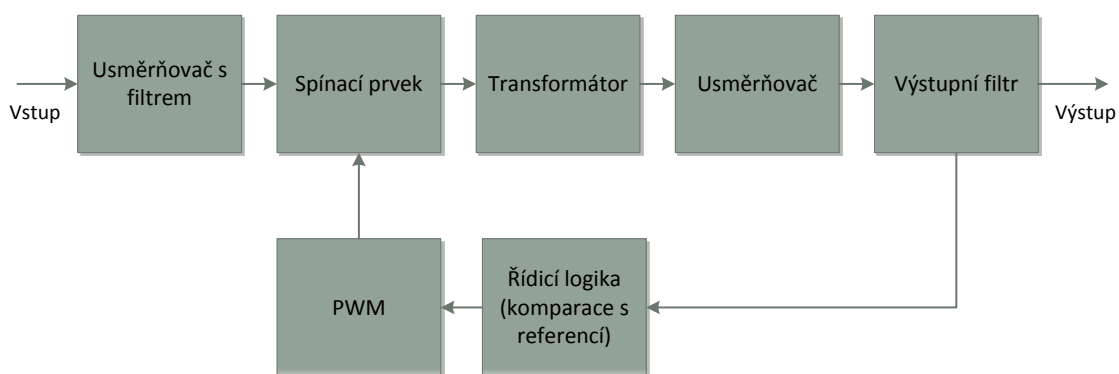
3.3 Spínané zdroje

Spínané zdroje se vyznačují využitím výkonového prvku v režimech, ve kterých má minimální ztrátový výkon. Díky tomu mají vyšší účinnost, menší tepelné ztráty a dosahují menších rozměrů. Existují různé principy, na kterých spínané zdroje zakládají. Spínané zdroje lze dělit podle různých kritérií, nejčastěji se však zdroje rozdělují na základě jejich principu přenosu energie. Spínané zdroje využívají principů snižujících, zvyšujících či invertujících spínaných DC měničů. [9]

Zdroje lze dělit podle principu přenosu energie následujícím způsobem:

- Zdroje s propustným zapojením
- Zdroje s akumulujícím zapojením
- Zdroje s dvojčinným zapojením

Blokové schéma typického spínaného zdroje je následující



Obrázek 1 - Základní blokové schéma spínaného zdroje

3.3.1 Zdroje s akumulací energie – typ FLYBACK

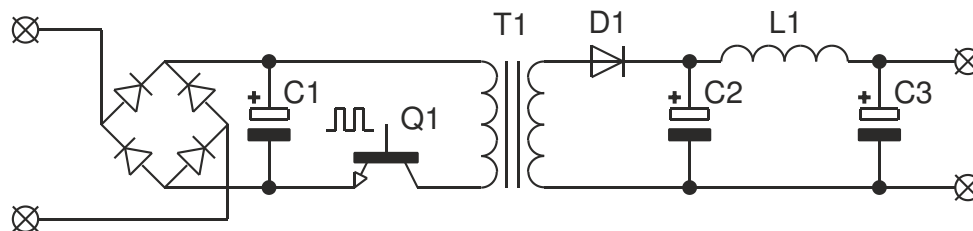
Tyto zdroje využívají principu akumulace energie v jádře transformátoru. Energie tedy není přenášena přímo, ale až po odpojení primárního vinutí transformátoru od zdroje. Jsou konstruovány tak, že sekundární vinutí je zapojeno v opačném smyslu než vinutí primární. Usměrnující dioda na výstupu tak při připojení primárního vinutí ke zdroji blokuje proud sekundárním vinutím. To vede k akumulaci energie v jádře. Kladné napětí na výstupu vznikne až zápornou změnou proudu primárním vinutím v čase, tedy po odpojení vinutí spínacím prvkem. [9]

Tento typ zdroje umožňuje díky použitému transformátoru snadné galvanické oddělení výstupních obvodů. Dokáže pracovat ve zvyšujícím i snižujícím režimu. Regulace spínání výkonového prvku se odvíjí od zpětné vazby. Ta může být pro dodržení galvanického oddělení tvořena optočlenem nebo dalším sekundárním vinutím.

Nevýhodou této koncepce je možné stejnosměrné sycení jádra, což může mít při zátěži za následek jeho přesycení. Přesycené jádro se vyznačuje tím, že má všechny obsažené magnetické domény orientovány ve směru magnetické indukce. Tím se znemožní další ovlivnění magnetického toku do sekundárního vinutí zvýšením proudu primárním

vinutím. To projeví ztrátou výkonu a pravděpodobným přetížením výkonového prvku zdroje, který bude v důsledku zpětnovazební regulace proudově namáhán.

Typické zapojení zdroje s akumulací energie bez zpětné vazby je na obrázku.



Obrázek 2 - Schéma obecného FLYBACK zdroje bez zpětné vazby

3.4 Frekvenční filtry

V této kapitole nejdříve popíšeme vlastnosti frekvenčních filtrů a základy teorie frekvenčních filtrů. Později se pokusím objasnit postupy a úvahy, které jsem využil při návrhu vstupních filtrů jednotlivých měřicích modulů navrhovaného zařízení.

3.4.1 Základní teorie

Frekvenčními filtry se rozumí selektivní obvody, které mají za úkol propustit, nebo naopak potlačit napětí o dané frekvenci.

Pro popis filtrů se využívá vyjádření jejich přenosu ve frekvenční (obrazové) oblasti p (komplexní proměnná). Při výpočtech se setkáme s přenosovou funkcí filtru $F(p)$, což je poměr Laplasovy transformace jejich výstupního a vstupního signálu. Počítání v této oblasti umožňuje práci s relativně jednoduchými algebraickými rovnicemi, zatímco výpočty v časové oblasti vedou k rozsáhlým diferenciálním rovnicím. Pro napěťový přenos tedy platí:

$$F(p) = \frac{U_{out}(p)}{U_{in}(p)} = \frac{a_m p^m + a_{(m-1)} p^{(m-1)} + \dots + a_0}{b_n p^n + b_{(n-1)} p^{(n-1)} + \dots + b_0} \quad (1)$$

Počet koeficientů ve jmenovateli přenosu určuje řád filtru a vychází z počtu komponent filtru (nemusí být shodný). Zvýšením řádu filtru lze dosáhnout větší strmosti za cenu větší složitosti návrhu.

Kořeny jmenovatele přenosu se nazývají póly a kořeny čitatele jsou nuly.

Pro analýzu vlastností filtrů se využívá jejich frekvenční charakteristika, což je graficky znázorněný průběh amplitudový přenos na určitém frekvenčním rozsahu. Kromě frekvenční charakteristiky se využívá také fázová charakteristika, která vyjadřuje fázový posun v závislosti na frekvenci. Vzhledem k tomu, že změna ve fázi při změně frekvence se projeví časovým zpožděním signálů rozdílných frekvencí, je v určitých aplikacích důležité sledovat také tento jev.

Pro vyjádření amplitudy při dané frekvenci lze proměnnou p nahradit za $j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$) a vypočítat modul, tedy absolutní hodnotu, přenosu:

$$|F(j\omega)| = \left| \frac{U_{out}(j\omega)}{U_{in}(j\omega)} \right| \quad (2)$$

pro vyjádření v dB

$$A = 20 \log |F(j\omega)| = 20 \log \left| \frac{U_{out}(j\omega)}{U_{in}(j\omega)} \right| \quad (3)$$

fázový posun je vyjádřen argumentem komplexního čísla

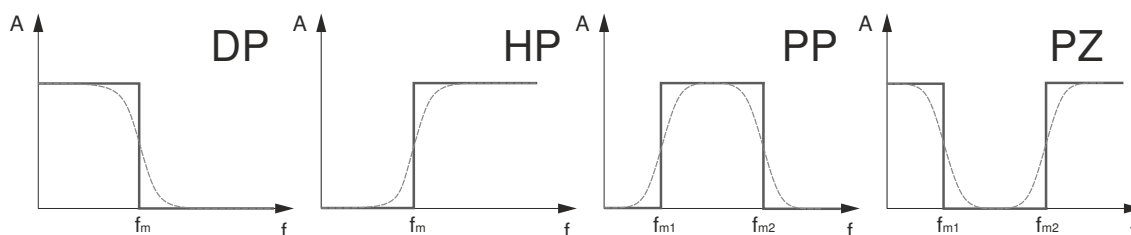
$$\varphi = \arg F(j\omega) = \arg \frac{U_{out}(j\omega)}{U_{in}(j\omega)} \quad (4)$$

Uvedené informace vychází ze zdrojů [14][7]

Typy filtrů

Rozlišujeme tyto základní typy filtrů:

- Filtry typu dolní propust, též LPF (low pass filter)
- Filtry typu horní propust, též HPF (high pass filter)
- Filtry typu pásmová propust, též BPF (band pass filter)
- Filtry typu pásmová zádrž, též BSF (band stop filter)
- Všeprůstčné fázovací dvojbrany



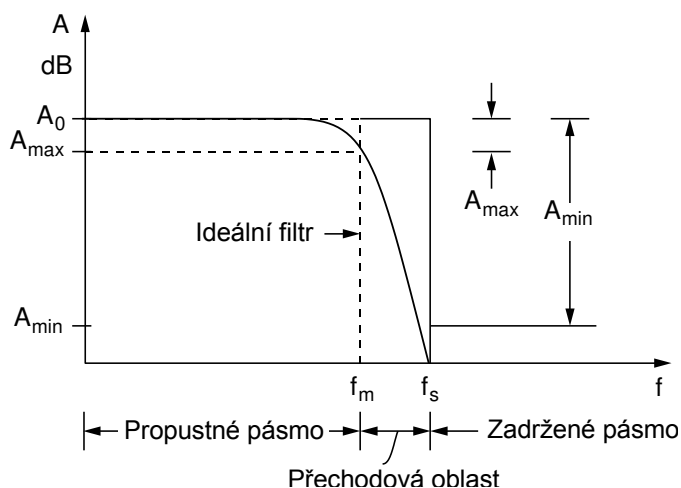
Obrázek 3 - Ideální a reálné frekvenční charakteristiky základních typů filtrů

Na obrázku jsou vyobrazeny ideální frekvenční charakteristiky základních typů filtrů. Písmeno A značí přenos, horizontální osa je položena do nulové hodnoty. Ideálních průběhů vlivem reálných parametrů součástek nelze u analogových filtrů dosáhnout, skutečné průběhy se tak spíše blíží průběhům znázorněným čárkovaně.

3.4.2 Aproximace přenosových charakteristik

Jak jsem již zmínil, z fyzikálních důvodů nelze ideální přenos filtru realizovat. Z tohoto důvodu se používají aproximace přenosových charakteristik, které definují tvar

charakteristického polynomu filtru tak, aby se výsledný filtr co nejvíce blížil ideálnímu. Existuje více druhů aproximací, přičemž každá z nich se hodí pro jinou aplikaci. Pro volbu správné aproximace je zapotřebí stanovení požadavků a tolerancí filtru. Pásmu vymezujícímu plochu, kterou může aproximovaná frekvenční charakteristika procházet, se říká toleranční pásmo.



Obrázek 4 - Toleranční pásmo charakteristiky DP (převzato a přeloženo z [14])

Prostor mezi A_0 a A_{max} určuje povolenou změnu v přenosu propustného pásma, tedy zvlnění. Parametr A_{min} stanovuje požadavek na minimální útlum zadržovaných frekvencí. V propustném pásmu zpravidla není dovolen pokles větší než 3 dB.

Existují různé metody aproximace frekvenčních charakteristik filtru, které stanovují požadavky na tvar jmenovatele přenosové funkce. Hodnoty koeficientů v normalizovaném stavu lze vyčíst z tabulek nebo je lze odvodit podle konkrétního předpisu. Tabulky lze najít například ve zdroji [14].

Mezi nejčastěji používané aproximace patří:

Butterworthova aproximace

Vyznačuje se maximálně plochou frekvenční charakteristikou v propustném pásmu. Strmost útlumu je 20 dB na dekádu pro každý pól přenosové funkce.

Čebyševova aproximace

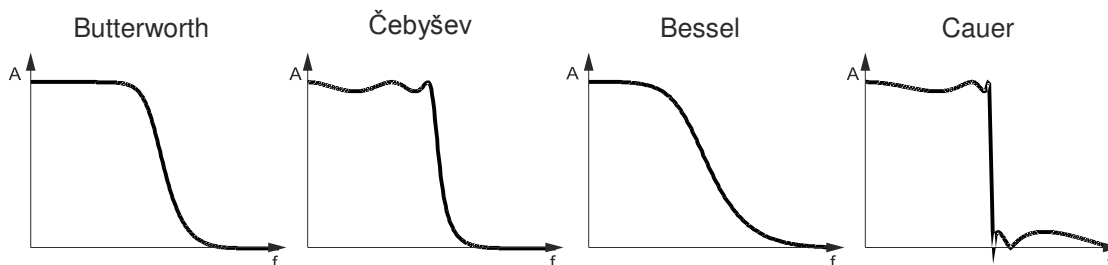
Dosahuje větší strmosti než Butterworthova aproximace při zachování stejného řádu filtru. Nevýhodou je zvlnění v oblasti mezního kmitočtu.

Besselova aproximace

Oproti předchozím dvěma aproximacím má výhodu v konstantním zpoždění signálů v propustném pásmu. Hodí se tak například pro filtrování obdélníkového signálu, který sestává z širokého spektra frekvencí a různé zpoždění každé z nich by vedlo ke zkreslení. Nevýhodou je menší strmost

Cauerova aproximace

Také nazývaná jako eliptická. Vyznačuje se velkou strmostí, zvlněním v okolí mezní frekvence a špičkovým kolísáním útlumu v zadržujícím pásmu.



Obrázek 5 - Srovnání různých typů aproximací frekvenční charakteristiky

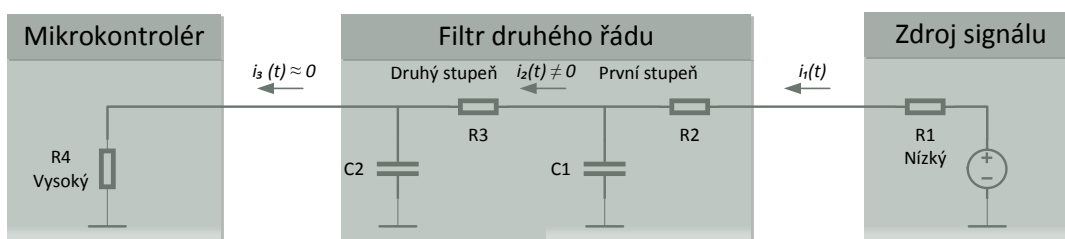
Tyto aproximace lze aplikovat na různá zapojení (topologie) filtrů, ze kterých se odvozuje přenosová funkce. V mnohých případech není mezi způsoby zapojení znatelný rozdíl, někdy je však z reálných fyzikálních důvodů nutné zvažovat i použitou topologii, aby se předešlo například projevu nelinearity součástek vlivem jejich nedokonalosti. Typickým příkladem mohou být zapojení s operačním zesilovačem, kde se může projevit nelinearita vlivem saturace zesílení.

Teorie filtrů, aproximací a jejich topologií je velmi rozsáhlé téma, proto jsem se zde pokusil vystihnout pouze základy problematiky. Pro další informace doporučuji například literaturu [17][11][5].

3.4.3 Pasivní filtr druhého řádu

Ve dvou ze tří modulů navrhovaného zařízení bude měřen stejnosměrný signál. V obou případech je vyžadována rychlá reakce na změnu měřeného signálu. Měření bude probíhat na dlouhém vedení, které může být ovlivněno výrazným rušením. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby byl měřený signál dobře filtrován. Zároveň je však nutné, aby byl modul schopen dostatečně rychle vyhodnotit změnu na vedení. Proto u těchto modulů budou využity filtry typu dolní propust.

Na obrázku níže je vyobrazen měřicí řetězec s pasivním filtrem druhého řádu.



Obrázek 6 - Měřicí řetězec s pasivním filtrem druhého řádu

Pro dosažení požadované strmosti útlumu filtru 40 dB na dekádu by při aplikaci jednoduchých úvah blokové algebry spojitých systémů stačilo kaskádně zapojit dva stejné filtry prvního řádu za sebe. Tento postup však není správný, neboť při aplikaci

blokové algebry se nepočítá se vzájemným zpětným ovlivňováním bloků. To, že se jednotlivé bloky ve skutečnosti ovlivňují, je způsobeno nenulovým výstupním proudem prvního stupně filtru. [7]

Pokud by byl každý blok stejný, proud vystupující z rezistoru prvního stupně by byl rozdělen mezi kondenzátor prvního stupně a druhý stupeň filtru. To by vedlo ke změně parametrů filtru.

V ideálním případě by měla být impedance druhého stupně blízká nekonečnu, zatímco impedance prvního stupně by měla být tak malá, aby nebyla ovlivněna druhým stupněm. V reálných aplikacích je však zapotřebí uvážit reálné možnosti použití součástek. Nejenže nelze dosáhnout ideálních hodnot, ale v případě použití krajních hodnot by se projeví nežádoucí účinky.

Představme si měřený signál jako zdroj napětí s reálným vnitřním odporem, tak jako tomu je na obrázku. Je zřejmé, že pokud k takovému zdroji připojíme první stupeň filtru s velmi nízkou impedancí, vnitřní odpor zdroje značně ovlivní parametry filtru. První stupeň by tedy neměl mít až příliš nízkou impedanci.

Pokud si představíme rušení jako zdroj napětí s vysokým vnitřním odporem, nízké impedance by jím nebyly příliš ovlivněny. Pokud by však měl druhý stupeň filtru velmi vysokou impedanci, toto parazitní rušení by se mohlo projevit jako měřitelný signál. Zároveň bychom se dostali do hodnot blízkých vstupnímu odporu mikrokontroléru, který by opět ovlivnil druhý stupeň filtru. Vstupní impedance druhého stupně by tedy neměla být příliš vysoká.

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že impedance jednotlivých částí měřicího řetězce by měla být odstupňovaná ve vzestupném pořadí od zdroje signálu po vstup mikrokontroléru.

Konstrukce vyšších řádů pasivních filtrů je možná, avšak vzhledem k uvedeným skutečnostem je náročnější na návrh. Je zapotřebí počítat se vzájemným ovlivněním jednotlivých stupňů filtru. Navíc mají takovéto filtry větší útlum na propouštěných frekvencích. Jsou také choulostivější na přesnost součástek, které mohou snadno charakter filtru měnit. Mnohem větší je také pravděpodobnost zarušení, neboť je patrné, že při takovém návrhu budou použity i rezistory velmi vysokých hodnot (to však není podmínkou).

Z těchto důvodů mám za to, že pro dosažení vyšší strmosti je vhodné užití filtrů aktivních.

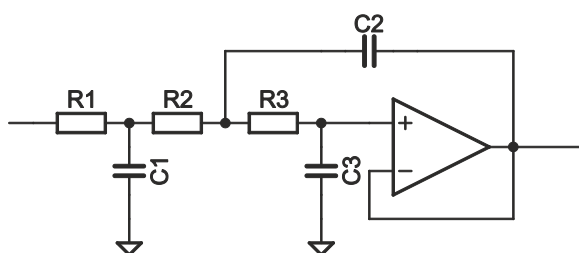
3.4.4 Aktivní filtr

Jak jsem již zmínil na předchozích řádcích, pro filtraci s větší strmostí použijí v této práci aktivní filtr. Aktivní filtry se vyznačují použitím operačního zesilovače, který umožňuje vynechání induktoru, který se pro mikroelektronické filtry nehodí kvůli svým rozměrům a parazitním vlastnostem.

Vstupní impedance těchto filtrů je zpravidla velmi vysoká, zatímco výstupní impedance dosahuje nízkých hodnot. Díky tomu lze aktivní filtry řadit kaskádně za sebe pro dosažení vyšších řádů přenosové charakteristiky. Zvyšováním řádu filtru, tedy navýšením počtu kořenů charakteristického polynomu, lze zvýšit strmost útlumu filtru a více se tím přiblížit ideálnímu průběhu. Problémem filtrů vyšších řádů jsou větší fyzické rozměry a parazitní parametry součástek a vedení, které dokážou značně ovlivnit jejich parametry. Proto je lepší volit filtr nejnižšího přípustného řádu.

Později v této práci budu řešit situaci, kdy bude zapotřebí měřit frekvence až 250 Hz, přičemž v okolí frekvence 1 kHz bude možná přítomnost nežádoucího rušení. Pro oddělení užitečného signálu od rušení využiji již zmíněný aktivní filtr třetího řádu.

Rozhodl jsem se pro využití velmi časté topologie Salen-Key, která se vyznačuje jednotkovým zesílením. Díky tomu nehrozí projevy nelinearity vlivem saturace zesílení. Tato topologie zároveň oproti ostatním nezesiluje vstupní šum. Prakticky se jedná o aktivní filtr druhého řádu s předřazeným pasivním filtrem prvního řádu. To je typický postup při realizaci filtrů lichých řádů.



Obrázek 7 - Filtr 3. řádu s topologií Salen-Key

Při návrhu je také zapotřebí uvažovat rozsah provozních teplot, neboť součástky filtru mění své parametry s teplotou. Nejvýznamnější změny nastávají často u kondenzátorů, proto je nutné volit z takových součástek, které jsou na teplotě závislé jen minimálně.

Po uvážení všech omezení lze využít některého z volně dostupných návrhových prostředků. Já jsem v této práci například použil webový nástroj dostupný na adrese <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Sallen3tool.php>.

3.5 Sériová komunikace

Navrhované zařízení má za úkol měřit tři veličiny, které musí předat řídicímu mikrokontroléru, který je zpracuje nebo odešle dále nadřazenému systému. Z toho vyplývá, že je zapotřebí zvolit vhodný způsob komunikace mezi jednotlivými moduly a hlavním, řídicím, mikrokontrolérem. V této kapitole se pokusím popsat základní principy použitých standardů a komunikačních protokolů.

3.5.1 Rozhraní UART

Zkratka UART znamená v angličtině Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, tedy v překladu se jedná o univerzální rozhraní obsahující asynchronní přijímač a

vysílač dat. Toto rozhraní je dnes součástí drtivé většiny mikrokontrolérů a umožňuje implementaci různých komunikačních standardů, jako jsou například RS-232 nebo RS-485. Rozhraní neřeší hardwarovou vrstvu standardu. Úrovně se odvíjí od napájení mikrokontroléru. V případě potřeby jiných úrovní se používá další fyzická periférie.

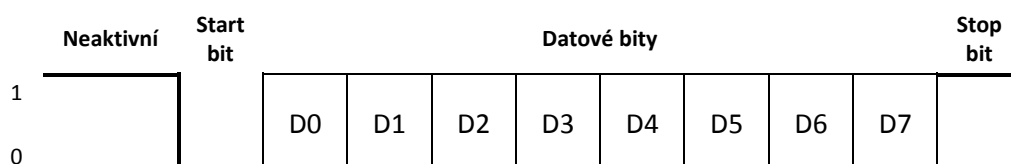
Vzhledem k tomu, že je přenos asynchronní, je zapotřebí, aby obě komunikující strany měly shodně nastavenou rychlost rozhraní, takzvaný baud rate. Baud rate určuje rychlost odesílání jednotlivých bitů (včetně provozních) po lince, nejedná se tedy o rychlost přenosu dat. V některých případech je přijímač schopen baud rate rozpoznat, není to však běžné.

Jeho úkolem je převod paralelních dat na data sériová a zajištění jejich přenosu.

Může pracovat v plně duplexním (obousměrném), poloduplexním, pouze vysílacím nebo pouze přijímacím režimu. Jednotlivé režimy poskytují stejné funkce a liší se pouze ve využití dostupných prostředků.

Rozhraní umožňuje různé nastavení zahájení a zakončení komunikace a volbu parity pro alespoň částečné ověření správnosti dat. Parita je tvořena jedním bitem, který je přidán za každá přenesená data. V případě liché parity je bitu přiřazena 0, pokud je celkový počet jedniček v přenášeném bloku lichý. V případě sudé parity je tomu naopak.

V klidovém stavu je na lince logická 1. Pro zahájení komunikace musí rozhraní vyslat startovací bit, který je reprezentován logickou 0. Po odeslání startovacího bitu následuje blok dat, který může být v závislosti na konfiguraci 6 až 8 bitů dlouhý. Následuje volitelný bit parity a blok stop bitů. Těch může být 1, 1,5 (jedna a půl periody) nebo 2. Vzhledem k tomu, že stop bit má, stejně jako neaktivní linka, logickou úroveň 1, v praxi se projeví jako prodleva mezi jednotlivými rámci.



Obrázek 8 - UART rámec RS-232 – 8 datových bitů, bez parity, 1 stop bit

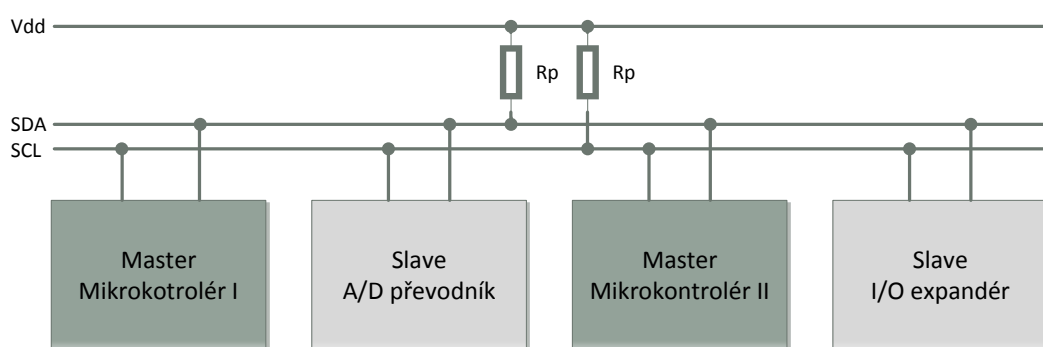
Rozhraní obsahuje nezávislé zásobníky dat. Jednoduché typy jsou vybaveny jen jednobytovým zásobníkem, ty pak zpravidla vygenerují přerušení a musí čekat, než si mikrokontrolér data vyčte. V opačném případě mohou být data přepsána a tudíž i ztracena. To je pro mikrokontrolér časově náročné, obzvláště při vyšších přenosových rychlostech. Proto se často využívají větší zásobníky typu FIFO, díky kterým není nutné obsluhovat rozhraní po každém přeneseném bytu.

3.5.2 Sběrnice I²C

Tato sběrnice je také známa pod označením IIC (Inter-Integrated Circuit). Byla vyvinuta firmou Philips v osmdesátých letech a do dnešní doby byla její definice

rozšířena o několik provozních režimů, které definují požadavky pro rychlejší přenos a rozšiřují možnosti adresování.

Sběrnice definuje jak fyzické rozhraní, tak i komunikační protokol. Podporuje single ended multi-master a multi-slave topologii. Ke sběrnici tedy může jak z hlediska přijímání, tak z hlediska odesílání přistupovat více zařízení najednou, přičemž v případě konfliktu proběhne arbitráž. Fyzické rozhraní je tvořeno dvou vodičovým propojením jednotlivých prvků, které se připojují paralelně. Vedení nemusí být nijak zvláště zakončeno, jako tomu je u jiných standardů. Jedinými podstatnými požadavky jsou pull-up rezistory připojené ke každému z vodičů pro definování výchozího stavu a maximální kapacita vedení. Konkrétní hodnoty lze zjistit z dokumentu specifikujícího sběrnici od firmy NXP (dříve Philips). [6]



Obrázek 9 - Příklad připojení zařízení na sběrnici I²C

Každé zařízení, které je ke sběrnici připojeno, má svou adresu. Adresa je běžně sedmibitová, ale v závislosti na režimu může být také 10 nebo 16 bitová.

Průběh komunikace

Přistoupím k popisu běžné komunikace po sběrnici, ke které jsou připojena zařízení se sedmibitovou adresou. Představme si, že mikrokontrolér I (master) z předchozího obrázku potřebuje vyčíst stav vstupního portu I/O expandéru (slave).

Na začátku předpokládáme neaktivní sběrnici, vodiče SDA a SCL jsou tedy v logické 1.

Mikrokontrolér zahájí přenos odesláním start bitu, tedy logické 0 na linku SDA a provede hodinový pulz na lince SCL. Zde je důležité poznamenat, že specifikace nedovoluje změnu úrovně na datovém vodiči SDA během hodinového cyklu.

Po odeslání start bitu následuje 7 bitová adresa perferie a bit rozlišující čtení a zápis. Délka adresy není zvolena náhodně, spolu se startovacím bitem tvoří 1 byte. Protokol vyžaduje, aby byl každý odeslaný byte, tedy 8bitů, na SDA potvrzen adresovaným zařízením.

Následuje tedy uvolnění linky SDA mikrokontrolérem a odeslání hodinového pulzu, při kterém master sleduje SDA a slave buďto odešle nebo neodešle na SDA informaci o

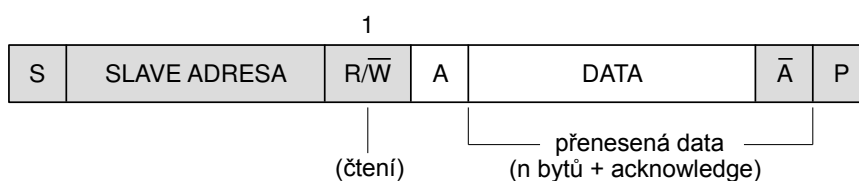
přijetí dat. Pokud potvrzení neproběhne, mikrokontrolér se může pokusit o nové zahájení přenosu nebo odeslat stop bit a odmlčet se.

Po přijetí potvrzení o přijetí dat (ACK) následuje přenos dat, v našem případě začne slave (I/O expandér) odesílat data. Obdobně, jako tomu bylo v předchozím kroku, po odeslání každého bytu očekává potvrzení o přijetí, tedy ACK bit. Zde však nastává specifická situace. Pokud master neodešle potvrzení ACK, slave musí přestat odesílat. Takovému stavu se říká NACK. Pokud by master potvrzoval každý byte pomocí ACK, nebyl by schopný přenos zastavit.

Po dokončení přenosu odešle master stop bit.

Pokud by kdykoliv během komunikace příjemce nestíhal zpracovat data, může komunikaci přidršet přizemněním SCL linky.

Záznam komunikace by v tomto případě vypadal tak, jako na obrázku. Tmavší pole značí bity odeslané mikrokontrolérem (masterem). [6]



Obrázek 10 - Záznam průběhu vyčítání dat po I²C (vychází ze [6])

Arbitráž

Pokud se ke sběrnici pokusí přistoupit dvě master zařízení, dochází k arbitráži. Tento proces je velmi jednoduchý. Každý vysílač na sběrnici si zpětně hlídá linku SDA, pokud zjistí neshodu, odmlčí se. Z toho vyplývá, že prioritu má zařízení, které adresuje periférii s nižší adresou. Při první logické 0 v adrese zařízení s nižší adresou totiž master, který adresuje zařízení s vyšší adresou, zaznamená neshodu. Tato metoda přístupu ke sběrnici se odborně nazývá CSMA/CD (Carrier sense multiple access with collision detection).

3.5.3 Sběrnice CAN

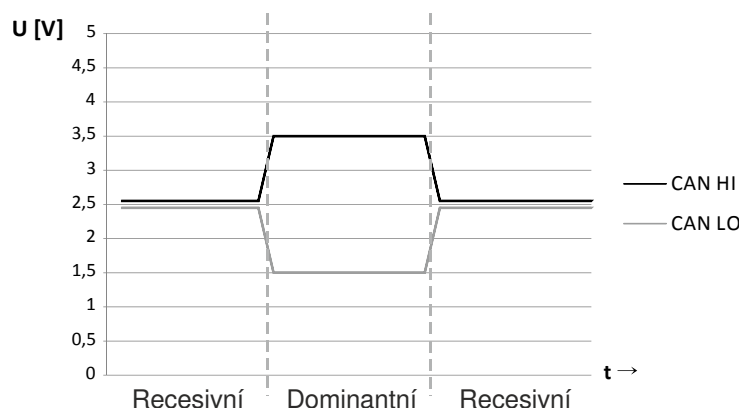
Sběrnice CAN, tedy Controller Area Network vznikla v osmdesátých letech. O její vznik se zasloužila firma Robert Bosch. Vzhledem k tomu, že byla od počátku vyvíjena pro automobilový průmysl s důrazem na bezpečnost, jedná se o velmi robustní sběrnici se spoustou kontrolních mechanismů, které zajišťují spolehlivý přenos dat.

Původní specifikace CAN umožňuje implementaci sběrnice na různých fyzických médiích, jako jsou například metalické vedení, optika, nebo i rádiové frekvence.

Od základní specifikace jsou dále odvozeny standardy, které již přesně definují požadavky na fyzickou vrstvu.

Jedná se například o jeden z nejpoužívanějších standardů ISO 11898, který stejně jako ostatní standardy používané v automobilovém průmyslu specifikuje 5V diferenciální

zapojení. Řadič CAN je často implementován v mikrokontrolérech. Samotný budič sběrnice však bývá z výše uvedených důvodů připojen zvlášť



Obrázek 11 - Napětové úrovně dle ISO 11898

Jedná se o asynchronní sběrnici. Na sběrnici CAN se rozlišují úrovně dominantní a recesivní. Recesivní úroveň je obvykle (při použití symetrického vedení dle standardu ISO11898 nebo podobných) tvořena souhlasným napětím mezi diferenciálními vodiči CAN HI a CAN LO. Dominantní jsou kladnější napětí na lince CAN HI a zápornější napětí na lince CAN LO. Každé zařízení, které je ke sběrnici připojeno se chápe jako uzel. Oba konce sběrnice musí být zakončeny odpory 120 Ω . Sběrnice CAN umožňuje komunikaci rychlostí až 1 Mbit/s, nicméně této rychlosti lze dosáhnout pouze na vzdálenosti do 40 m, pro vzdálenosti nad jeden kilometr je reálná rychlost přenosu v řádu desítek kbit/s.

Předpokládá se přenos důležitých i nedůležitých dat po stejné sběrnici. Pro arbitráž při případném konfliktu vysílačů se využívá takové metody náhodného přístupu, která umožňuje nastavení priorit. K tomu se používá, stejně jako u IIC, metoda CSMA/CD. Každý vysílač si tedy zpětně kontroluje přítomnost svých dat na sběrnici a v případě neshody se určitou dobu odmlčí. Díky této metodě nedochází ke ztrátě dat a sběrnice je velmi vhodná také pro přenos dat v reálném čase.

Protokol CAN je založen na komunikaci pomocí zpráv. Ty mohou být různých typů, přičemž základní je datová. Aktualizovaná specifikace CAN 2.0B definuje rychlost přenosu až 1 Mbit/s a možnost prodloužených zpráv (*extended*).

Na rozdíl od jiných nevyužívá adresování příjemce, ale pouze identifikátor zprávy. Zprávu odeslanou na sběrnici přijímají všechny připojené uzly, které se pak samy rozhodnou, zda zprávu zpracují, nebo ji zahodí. Zpráva se skládá z více částí včetně identifikátoru, který slouží také pro arbitráž a z přenášených dat. Jednou z výhod tohoto mechanismu je možnost připojení nových zařízení bez nutnosti provádění změn v ostatních.

Další z funkcí protokolu CAN je možnost vyžádání zprávy od jiného uzlu. Tomu se říká Remote Transit Request (RTR). Uzly, které nejsou důležité tak mohou odesílat zprávy na vyžádání a díky tomu snížit provoz na sběrnici.

Odolnost proti rušení a zabezpečení přenosu zajišťují následující mechanismy:

- Použití kroucené dvojlinky a diferenciálních úrovní
- Přístupová metoda CSMA/CD
- Synchronizace uzlů při každém přechodu sběrnice do dominantní úrovně
- Vkládání bitu
- Potvrzovací a oddělovací bity
- Kontrolní součet CRC
- Oznamování a počítání chyb

Synchronizace souvisí s mechanismem vkládání bitů. Pro správnou funkci je za každý pátý shodný bit v datovém poli rámce vkládán bit opačné polaritě. Tento bit je očekáván a není zohledněn jako data. Tomuto se říká *bit stuffing*. V případě chyby je zpráva po prodlevě zopakována.

Potvrzení zprávy příjemci musí být provedeno na dané pozici v rámci přivedením dominantní úrovně na linku. V potvrzovacích polích *acknowledge*, v CRC polích, na koncích zprávy a mezi zprávami jsou definovány oddělovací bity recesivní úrovně. Pokud se na pozici těchto bitů vyskytne dominantní úroveň, je detekována chyba rámce a stejně, jako u chyby potvrzovacího bitu a chyby kontrolního součtu, je po uplynutí definované doby zpráva zopakována.

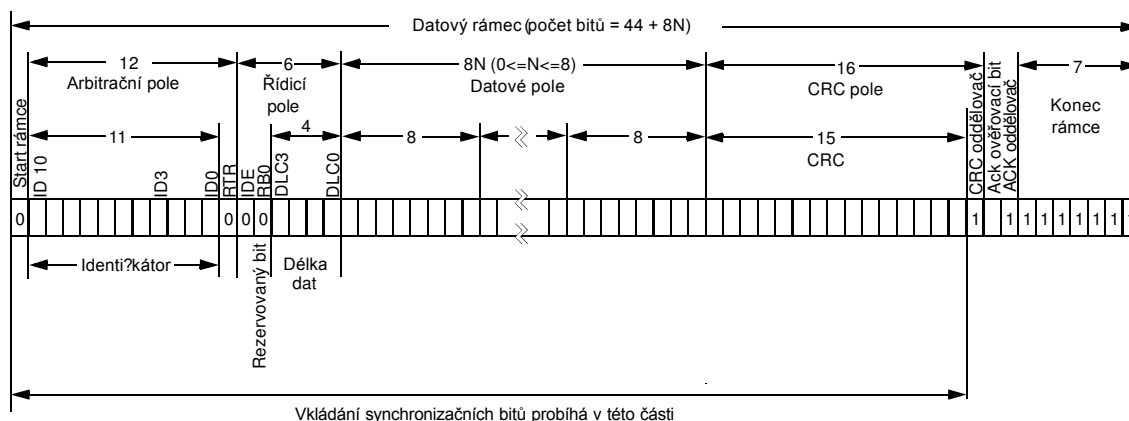
Každý uzel disponuje dvěma čítači chyb. Jeden čítač hlídá přijatá data, zatímco druhý ta odeslaná. V případě chyby se hodnota daného čítače navýší, v případě bezchybného přenosu se opět sníží.

V souvislosti se stavem čítačů se rozlišují tři chybové režimy uzlu:

- Error-Active – hodnota čítačů je menší než 128
- Error-Passive – hodnota čítače je větší než 127
- Bus-Off – hodnota vysílacího čítače je větší než 255

V prvním režimu může uzel aktivně vysílat dominantní chybové bity na sběrnici se záměrem porušení pravidla vkládání bitu. Ve druhém případě uzel záměrně porušuje podmínku vkládání bitu při recesivní úrovni. V posledním případě je uzel zcela vyřazen z komunikace. Pro vysílání informace o chybách jsou definovány samostatné typy zpráv. [15][22]

Pro ukázkou zprávy CAN jsem zvolil datovou zprávu o standardním rozsahu.



Obrázek 12 - Standardní datová zpráva CAN (převzato a upraveno z [15])

Problematika sběrnice a protokolů CAN je mnohem rozsáhlejší, na předchozích řádcích jsem se pouze pokusil vystihnout hlavní principy a náležitosti související s návrhem zařízení.

3.6 Použité mikrokontroléry

V této kapitole se pokusím čtenáře seznámit s mikrokontroléry, které byly zvoleny pro realizaci zařízení. Zabývat se budu hlavně komponenty, které souvisí s návrhem výrobku. Později popíši softwarové nástroje pro vývoj od firmy NXP (dříve Freescale).

3.6.1 Mikrokontroléry MC9S08PT16

Jedná se o osmibitové mikrokontroléry, které jsou vybaveny výpočetní jednotkou S08. CPU řady S08 disponuje (na rozdíl od předchůdce HC08) kontrolérem BDC (Background Debug Controller) umožňujícím snadné ladění vyvíjených aplikací. Jedná se o architekturu typu von Neumann s kompletní sadou instrukcí. Výpočetní jednotka podporuje řetězení instrukcí, tedy takzvaný pipelining. Mikrokontroléry řady S08 podporují až 40 zdrojů přerušení.

Vyznačují se především výborným poměrem cena/výkon a jsou vybaveny velkým množstvím periférií, jako jsou například A/D převodníky, časovače, čítače, řadiče pro komunikaci a jiné. Zmiňované periferie je zde možné v případě nevyužití vypínat a při využití možnosti uspaní je možné maximálně minimalizovat energetickou náročnost kontroléru. Díky těmto vlastnostem jsou využívány v nejrůznějších oblastech, jako je vybavení domácnosti nebo i průmysl.

Klíčové vlastnosti pro použití v navrhovaném zařízení

- Takt sběrnice až 20 MHz při napájení z napětí 2,7 V až 5,5 V
- Provozní teplota -40 °C až 105 °C
- Zdroj vnitřních hodin s odchylkou maximálně 1% na teplotním rozsahu 0 °C až 70 °C a 2% na rozsahu -40 °C až 105 °C
- Kontrolér pro ladění kódu (debug)

- 12 bitový A/D převodník s dobou převodu 2,5 μ s
- Hardwarová implementace kontrolního součtu CRC
- Časovač s osmibitovou děličkou a přerušením při přetečení
- Rozhraní SCI (UART)
- K dostání také v 16 pinovém TSSOP pouzdru

3.6.2 Mikrokontroléry MCF51JM64

Jedná se o 32 bitové mikrokontroléry s jádrem ColdFire V1. Mikrokontroléry z této rodiny jsou specifické tím, že sdílí shodné periferie a vývojové nástroje s rodinou osmibitových kontrolérů S08. Migrace projektu mezi těmito rodinami je tedy relativně snadná. Kromě zmiňovaných periférií mají s řadou S08 také shodný modul pro ladění softwaru, ten je zde nazýván BDM (Background Debug Module).

Oproti řadě S08 disponují tyto mikrokontroléry větším výpočetním výkonem a to především díky využití 32 bitových instrukcí a dvoustupňovému pipeliningu (řetězení instrukcí).

Klíčové vlastnosti pro použití v navrhovaném zařízení

- Takt až 50,33 MHz při napájecím napětí 2,7 V až 5,5 V
- Teplotní rozsah -40 °C až 105 °C
- CAN řadič
- 2 rozhraní IIC
- 2 rozhraní SCI (UART)
- 2 16 bitové časovače, 2/6 kanálové
- Až 16 klávesových přerušení

3.7 Vývojové prostředí CodeWarrior 10.6.4

Při vývoji softwaru jsem se rozhodl využít vývojářských prostředků od výrobce zvolených mikrokontrolérů. Jak jsem již napsal v předchozích kapitolách, vývojové prostředí IDE (Integrated Development Environment) je pro oba kontroléry stejné. Výrobce jej nazývá CodeWarrior.

Prostředí CodeWarrior je založeno na univerzálním open source IDE zvaném Eclipse. To výrobce doplnil svými součástmi a umožnil tak snadný vývoj, kompilaci, nahrání programu do kontroléru a následné ladění z jednoho prostředí.

Při zakládání nového projektu lze vybrat konkrétní mikrokontrolér a hardware, který bude při vývoji použit. Prostředí si tak načte potřebné knihovny a ostatní podklady.

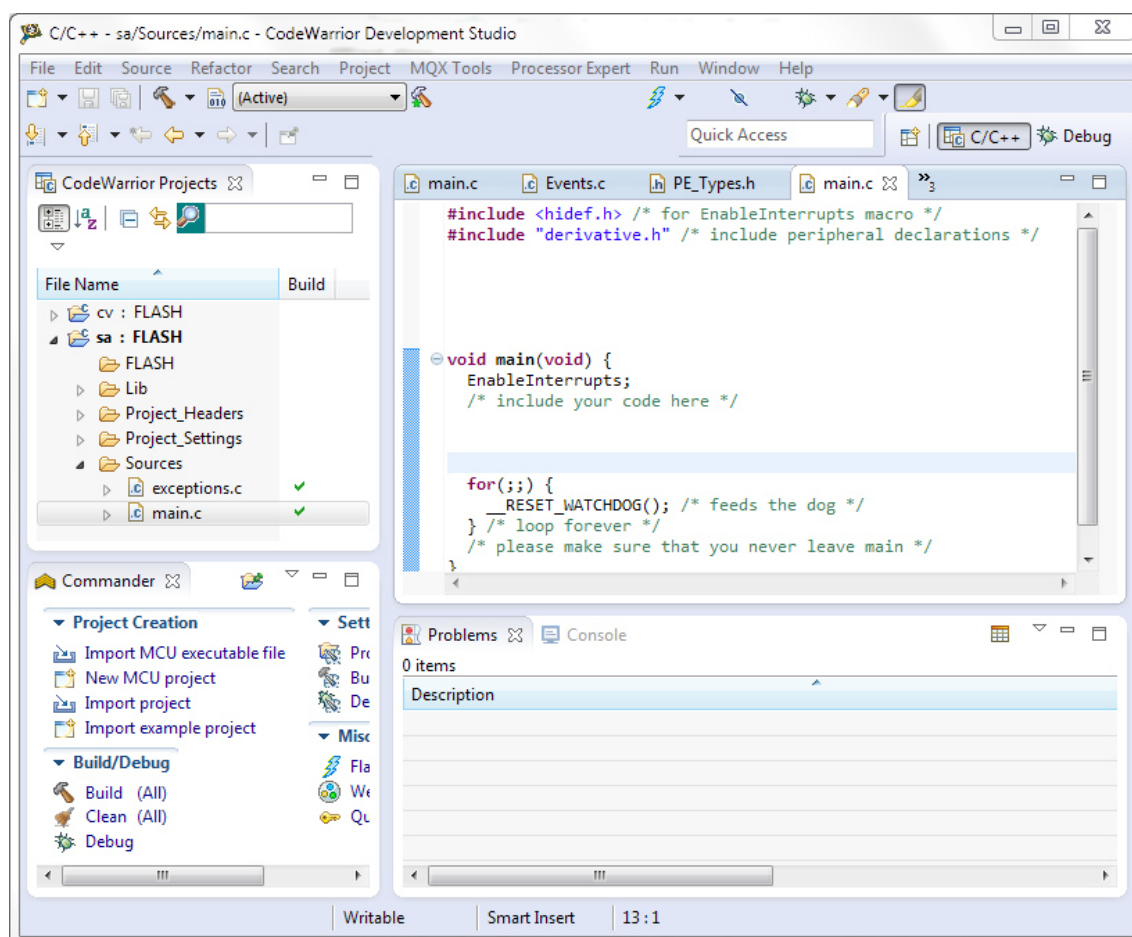
Okno prostředí si lze libovolně upravit zapnutím, vypnutím či přesouváním vnitřních oken s informacemi potřebnými pro vývoj.

Po vytvoření zdrojového kódu jej lze zkompileovat a buďto pouze nahrát do kontroléru pomocí ikony blesku na hlavním panelu nebo rovnou spustit ladění ikonou brouka.

Ladění probíhá řízením a sledováním průběhu programu pomocí komunikace programátoru s ladicí komponentou mikrokontroléru. Ta je schopna zastavit běh programu a zpřístupnit vnitřní registry kontroléru k náhledu a editaci.

Program tak lze postupně testovat podobným způsobem, jako tomu je u vývoje počítačových aplikací.

Mezi ladicím prostředím a editorem kódu se dá přepnout pomocí tlačítek v pravém horním rohu okna programu.



Obrázek 13 - Náhled na vývojové prostředí CodeWarrior 10.6

3.7.1 Vývojový systém Processor Expert

Processor Expert je převratný systém umožňující zrychlení vývoje nového softwaru pro všechny podporované platformy. Za jeho vznikem stojí brněnská firma UNIS, a.s. Díky tomuto systému se vývojář může soustředit především na algoritmy programu bez nutnosti perfektní znalosti všech registrů a vnitřní struktury mikrokontroléru (určitá znalost je však stále nutná).

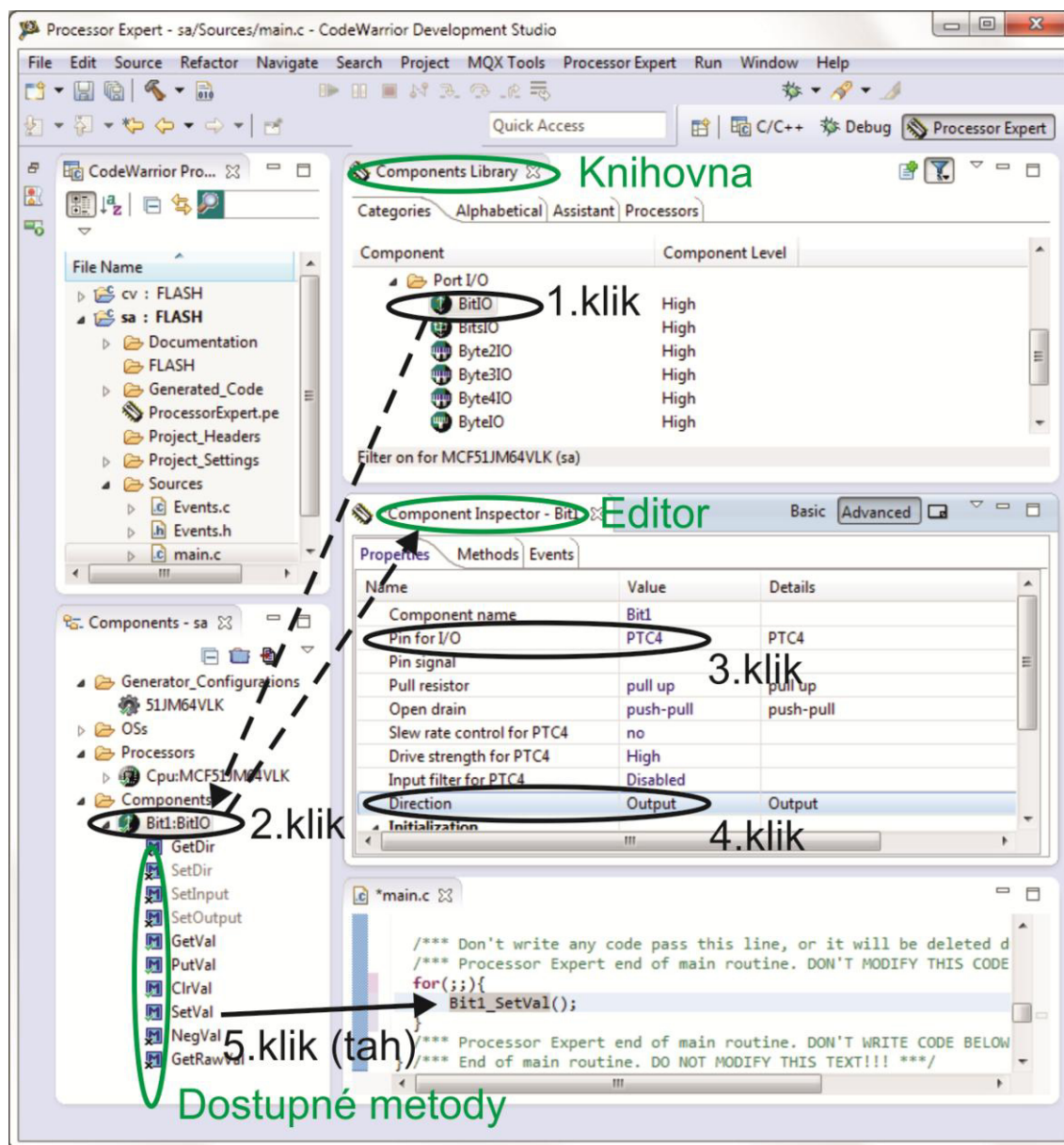
Jedná se o nástroj vývojového prostředí s uživatelským rozhraním, který umožňuje nakonfigurovat mikrokontrolér dle potřeb vývojáře a vytváří metody pro ovládání

jednotlivých funkcí kontroléru. Systém obsahuje také znalostní bázi, která vývojáři poskytuje potřebné informace.

Na začátku vývoje lze pouhým klikáním myši v prostředí Processor Expert vybrat z knihovny komponenty a periférie, které budou v projektu použity. Přidané komponenty lze pak opět snadno nakonfigurovat tak, aby fungovaly dle požadavků.

Metody lze do zdrojového kódu dokonce přesouvat myši, pro vytvoření primitivních programů tak v podstatě nemusí vývojář psát vůbec žádný kód.

Příkladem může být následující obrázek, kde jsem nastavil pin PTC4 mikrokontroléru jako výstupní a na jeho výstup jsem v hlavní rutině programu zapsal logickou 1. To vše pouhými pěti pohyby myši.



Obrázek 14 - Příklad využití systému Processor Expert

Hlavní výhody využívání těchto metod však spočívají v tom, že se program obejde bez řádků, které ovládají konkrétní registry specifické pouze pro jeden druh mikrokontroléru. Tím se značně usnadňuje případná migrace projektu na jinou platformu, kde pak postačí vytvořit komponenty se stejnými metodami.

Nevýhodou může být příliš velká komplexnost takto vytvořených programů, což může subjektivně nepříznivě ovlivnit přehlednost kódu mimo hlavní algoritmy a jeho velikost. Dá se však předpokládat, že po optimalizaci při překladu do strojového kódu tímto nebude výsledný program příliš zatížen.

Systém Processor Expert je vhodnou pomůckou i pro ty, kteří se nerozhodli pro jeho přímé použití. Díky jeho knihovně, editoru komponent a znalostní bázi lze snadno získat přehled o možnostech jednotlivých periférií.

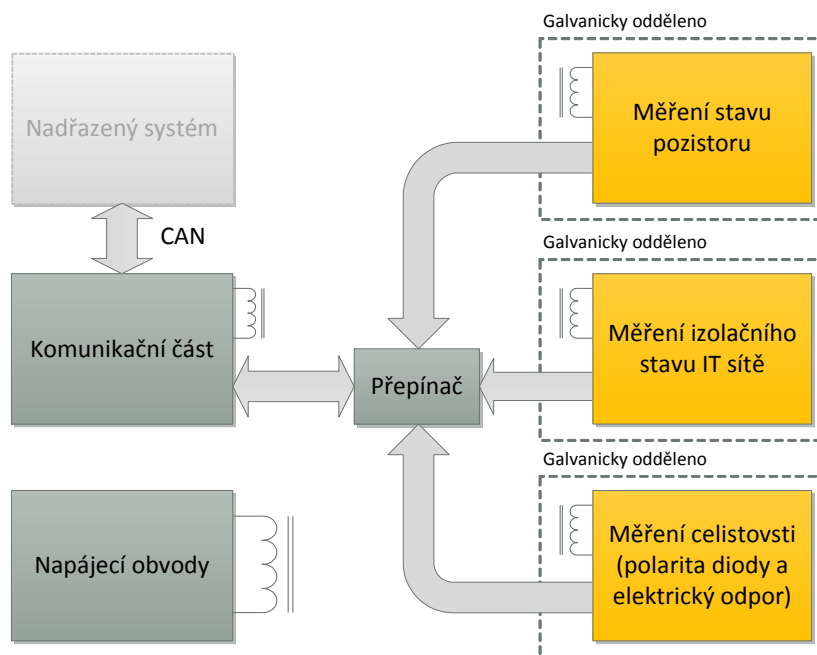
4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, zařízení se bude skládat z několika funkčních bloků. V následujících kapitolách se tedy budu věnovat celkovému popisu zařízení pomocí blokového schématu a následovně podrobnému popisu každého z funkčních bloků. Po objasnění funkce jednotlivých částí se budu věnovat návrhu elektrického zapojení a výpočtu konkrétních hodnot součástek.

4.1 Hlavní blokové schéma

Prvním krokem při návrhu nového zařízení je vždy vytvoření jeho hlavní koncepce. Na následujícím blokovém schématu jsem se snažil vyobrazit hlavní požadavky na tento výrobek. Žlutě jsou vyznačeny obvody, které budou spojeny s prostředím s nebezpečím výbuchu, musí tedy být navrženy jako nevýbušné. Jako druh ochrany bude zvolen typ „i“, tedy jiskrová bezpečnost.

Požadavek je takový, aby zařízení nahradilo funkci několika doposud používaných přístrojů. Tím by mělo být docíleno značné prostorové a ekonomické úspory, navíc se očekává zlepšení funkce.



Obrázek 15- Blokové schéma zařízení

Zadavatel požaduje měření tří stavů připojeného pozistoru, měření izolačního stavu v až třífázové IT síti a měření celistvosti připojeného vodiče.

V případě pozistoru by měly být rozlišeny následující stavy: Zkrat (odpor $< 50 \Omega$), dobrý stav (odpor $< 1,6 \text{ k}\Omega$) a porucha (odpor $> 3,6 \text{ k}\Omega$).

Rozsah měření elektrického odporu u měření izolačního stavu by měl být 0-10 M Ω s rozlišením 1 % z měřeného rozsahu.

Měření celistvosti spočívá v rozpoznání polaritě sériově připojené diody a měření elektrického odporu v rozsahu 0-100 Ω s rozlišením přibližně 0,1 Ω .

Naměřená data budou zpracována a zařízení bude připraveno ke komunikaci s nadřazeným systémem po sběrnici CAN.

Měřicí vstupy a výstupy zařízení budou připojeny k vedení, které je umístěno v prostředí s nebezpečím výbuchu. Samotný analyzátor pak bude umístěn mimo zónu s nebezpečím výbuchu a bude připojen k nechráněnému zdroji napětí a periferiím. Z tohoto důvodu je zapotřebí, aby byly měřicí bloky galvanicky odděleny od napájení a komunikační části zařízení.

Galvanické oddělení těchto částí bude zajištěno použitím blokujícího spínaného zdroje s bezpečným transformátorem. Transformátor bude mít oddělená vinutí dle požadavků norem pro zajištění jiskrové bezpečnosti. Pro oddělení komunikace budou použity optočleny, které také musí odpovídat normám. Z prostorových důvodů bude komunikace mezi měřicími bloky a komunikační částí zařízení pouze jednosměrná.

Jednotlivé optočleny budou připojeny ke vstupům přepínače (multiplexeru) tak, aby mohl hlavní mikrokontrolér postupně vyčítat naměřená data a zpracovávat je.

Po spuštění zařízení budou data z jednotlivých měřicích bloků přenášena s odstupňovaným zpožděním. Zpoždění bude dostatečné na to, aby byla data z předchozího modulu přenesena a zpracována. Tím by se mělo zamezit většině problémů se synchronizací a bude minimalizována ztráta informací.

4.2 Měření stavu pozistoru

Prvním měřicím modulem navrhovaného zařízení je měření stavu pozistoru. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, požaduje se rozlišení tří provozních stavů v závislosti na elektrickém odporu. Rozlišení stavů bude řešit řídicí mikrokontrolér v komunikační části zařízení. Tento modul bude do komunikační části přenášet pouze data z A/D převodníku. Vzhledem k nenáročným požadavkům postačí interní 12 bitový A/D převodník v mikrokontroléru. Stavy budou nastaveny po komunikaci nebo budou převzaty výchozí hodnoty.

Možné základní stavy jsou následující:

- **Zkrat** - odpor < 50 Ω
- **Dobrý stav** - odpor < 1,6 k Ω
- **Porucha** - odpor > 3,6 k Ω

4.2.1 Blokové schéma

Podobně, jako tomu bylo u předchozího blokového schématu, i zde jsou žlutou barvou vyznačeny bloky, které mají vliv na parametry ovlivňující jiskrovou bezpečnost. Slabě jsou vyznačeny části, které jsou k modulu připojeny, ale nejsou jeho součástí.

UTAJENO

Obrázek 16 - Blokové schéma měření stavu pozistoru

Prvním blokem je stabilizace a napěťová ochrana. Modul bude napájen ze sekundárního vinutí spínaného zdroje, tomu se budu věnovat v dalších kapitolách.

Pozistor je využit pro hlídání kritické teploty. Měřeným pozistorem by měl protékat co nejmenší proud, aby byl omezen vlastní ohřev součástky. Typicky se volí přibližně 1 mA. [4]

Očekávané hodnoty odporu pozistoru se pohybují v řádu jednotek k Ω . Proto bude výstup ze sekundárního vinutí vyhlazen a stabilizován na jedinou hodnotu 5 V. To je napětí potřebné pro napájení mikrokontroléru a zároveň dostačující pro měření.

Pro zajištění jiskrové bezpečnosti je zapotřebí zajistit definované maximální napětí na výstupních svorkách zařízení. Z tohoto důvodu bude za stabilizátor napětí zařazena napěťová ochrana. Od definovaných maximálních hodnot výstupního napětí a proudu se odvozují maximální povolené hodnoty kapacity a indukčnosti připojeného vedení.

Napěťová ochrana v prvním bloku zajistí definované výstupní napětí, pro zajištění definovaného výstupního proudu bude na výstupu zařazen ochranný rezistor.

Měření bude provedeno napěťově pomocí odporového děliče. Jednu část děliče bude tvořit rezistor uvnitř zařízení a druhou část, na které bude měřeno napětí, bude tvořit samotný pozistor. Měřené napětí je pak kvůli rušení filtrováno filtrem druhého řádu a připojeno k analogovému vstupu mikrokontroléru. K tomuto vstupu bude také připojena ochrana proti přepětí při provozním stavu.

Naměřená data pak mikrokontrolér odešle sériovou linkou do komunikační části. Kvůli galvanickému oddělení bude přenos probíhat přes optočlen, který vyhovuje normám pro jiskrovou bezpečnost.

4.2.2 Elektrické schéma

Stabilizace napájení

UTAJENO

Obrázek 17 – Schéma napájení měření pozistoru

První komponentou je pojistka, která chrání správnou funkci napěťových ochran. Při případném přepětí na výstupu spínaného zdroje a selhání napěťového stabilizátoru, což jsou dle normy 60079-11 z hlediska jiskrové bezpečnosti nezapočítatelné poruchy, by mohlo dojít ke zničení napěťových ochran. Ty jsou tvořeny Zenerovými diodami. Norma požaduje použití tří paralelních ochran z důvodu dosažení bezpečnosti zařízení i při dvou takzvaně započítatelných poruchách. V případě využití Zenerových diod, které jsou kusově testovány, však připouští použití pouze dvou takových diod. [3]

Při stanovení hodnoty pojistky je zapotřebí uvážit maximální přípustnou zatížitelnost Zenerovy diody.

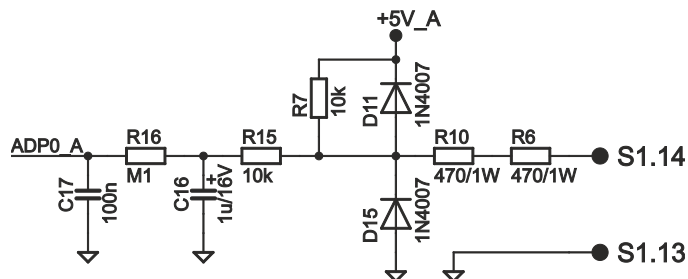
Zvolil jsem diodu typu SMBJ5339B, což je dioda z běžně využívané řady se Zenerovým napětím 5,6 V. Napětí je vyšší oproti napájecímu z důvodu nedostatečně ostré charakteristiky diody. Dioda s nižším nominálním napětím by propouštěla proud i v provozním stavu.

Zadavatel požaduje, aby mohlo být zařízení provozováno při teplotách okolí až 80 °C. Při této teplotě lze podle grafu č. 1 v datovém listu Zenerovu diodu zatížit přibližně $P_{Z_{max}} = 0,75 \text{ W}$. Při uvážení nejméně příznivé tolerance součástky, tedy 5 % může její závěrné napětí být až $U_{Z_{max}} = U_Z * 1,05 = 5,88 \text{ V}$.

Z těchto údajů vychází, že maximální proud diodou musí být omezen na maximálně $I_p = P_{Z_{max}}/U_{Z_{max}} = 128 \text{ mA}$. Norma 60079-11 však vyžaduje, aby součástky, na kterých závisí jiskrová bezpečnost, byly zatíženy maximálně na dvě třetiny jejich deklarovaných parametrů. Maximální přípustný proud diodou je tedy 1,5 krát menší. Dalším faktorem ovlivňujícím výběr pojistky je fakt, že na základě normy 60079-11 se u pojistek, na kterých závisí jiskrová bezpečnost, uvažuje trvalý proud pojistkou 1,7 krát větší než je jmenovitá hodnota pojistky. Pojistka tedy může mít maximální hodnotu $I_{n_{max}} = I_p/(1,5 * 1,7) = 50,1 \text{ mA}$. S přihlédnutím na uvedené okolnosti jsem zvolil pojistku s hodnotou 50 mA. [12]

Dále se zde nachází stabilizátor napětí LE50ABD, který je doplněn stabilizačními kondenzátory, jejichž hodnotu jsem převzal z datového listu. Tento typ jsem zvolil pro jeho široký rozsah vstupního napětí, což se bude hodit u dalších modulů, nízký šum a také jeho velikost. [20]

Vstupní obvod



Jak jsem již uvedl dříve, pozistor bude tvořit část napěťového děliče. Zbývající část děliče tvoří rezistor R7. Jeho hodnota bude 10 k Ω . Tuto hodnotu jsem zvolil s přihlédnutím k očekávaným hodnotám odporu připojeného pozistoru a k velikosti měřicího proudu. Ten by neměl překročit 1 mA. Hodnoty odporu se budou pohybovat v řádech jednotek k Ω .

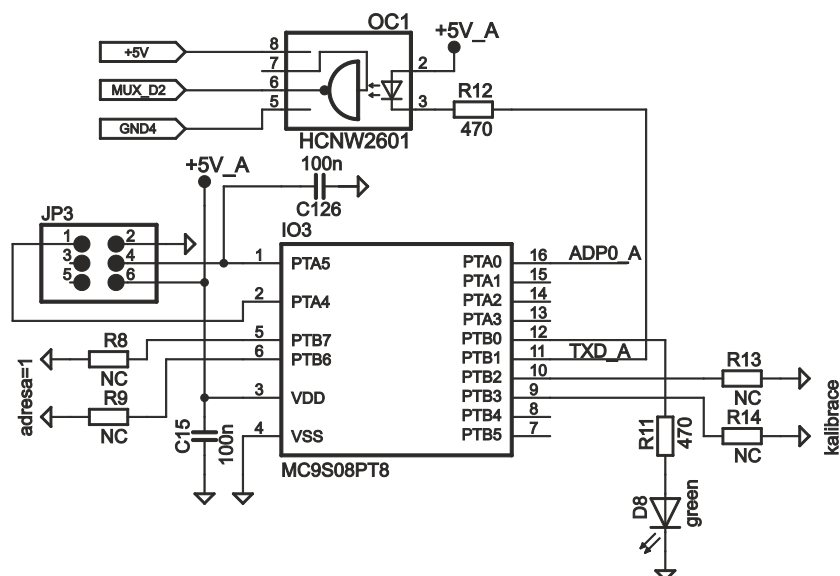
Dále jsou zde ochranné diody, které spolu s bezpečnostním odporem tvořeným rezistory R6 a R10 chrání proti přepětí a podpětí. Při podpětí na svorce 14 se přes diodu D15 a rezistory R6 a R10 uzavírá smyčka. Přebytečná energie je přeměněna na teplo. V případě přepětí se smyčka uzavírá přes diodu D11 a napěťové ochrany (Zenerovy diody) v napájecí části.

Rezistory R6 a R10 zároveň tvoří ochranný odpor z hlediska jiskrové bezpečnosti. Tím je ve spojení s napěťovými ochranami v napájecím bloku definován parametr maximálního výstupního proudu. Odpor je rozdělen mezi dva rezistory z praktických důvodů. Cílem je maximální úspora prostoru, proto budou zvoleny rezistory v provedení SMD. Tyto rezistory však mají jen omezenou napěťovou odolnost, proto byly zvoleny dva, které jsou zapojeny v sérii.

Zbývající součástky tvoří filtr typu dolní propust druhého řádu. Hodnoty součástek filtru jsou zvoleny tak, aby byl modul schopen dostatečně rychlé reakce v případě změny stavu pozistoru, ale zároveň tak, aby filtroval rušení a děje s nižší časovou konstantou. Nejvýraznější rušení se podle zadavatele očekává na frekvenci 1 kHz. Požadovaná rychlost reakce je přibližně 100 ms. S uvážením rezervy jsem tedy zvolil mezní frekvenci filtru na přibližně 15 Hz. Takový filtr má na frekvenci 1 kHz dostatečně velký útlum 80 dB.

37

Mikrokontrolér



Obrázek 19 - Mikrokontrolér v modulu měření pozistoru

Jako mikrokontrolér pro měřicí moduly jsem zvolil Freescale MC9S08PT8. Důvodem byl požadavek zadavatele na mikrokontrolér od firmy Freescale a především přítomnost sériové komunikace a dostatečný počet vývodů. Tento typ má také dostatečně velkou programovou paměť a 12 bitový A/D převodník.

K mikrokontroléru je připojen optočlen sloužící pro galvanické oddělení komunikace mezi modulem a řídicí částí zařízení. Tento typ (HCNW2601) splňuje požadavky normy 60079-11 pro jiskrovou bezpečnost. Zprávy odesílané měřicím mikrokontrolérem do řídicího budou ve formátu definovaném protokolem Modbus. Zpráva bude obsahovat informaci o nastavené adrese mikrokontroléru, typ zprávy, naměřená data a kontrolní kód.

K mikrokontroléru je dále připojena patice pro připojení programátoru a signálka. Z hlediska zjednodušení výroby bude do všech modulů nahrán stejný program. Ten přepne svou funkci podle nastavené adresy. Adresa bude kódovaná binárně na vstupech PTB6 a PTB7.

Podobným způsobem bude možné kontrolér přivést do režimu kalibrace. Kalibrovat se bude minimální a maximální mez měření. V tomto režimu bude mikrokontrolér fungovat podobně jako v provozním režimu. Jediný rozdíl bude v tom, že zpráva odeslaná do řídicí části bude označena jako kalibrační data. Hlavní mikrokontrolér si takto označená data uloží do paměti.

Měřené napětí je přivedeno na pin PTA0.

4.3 Měření izolačního stavu v IT síti

Dalším měřicím modulem bude měření izolačního stavu v až třífázové IT síti. Požaduje se spojitě měření celkového svodového odporu. V praxi se izolační stav použitého vedení zhoršuje vlivem stárnutí a opotřebení. Měření bude spojitě především z důvodu sledování trendu svodového odporu. To je důležité pro možnost plánování výměny kabeláže na příští plánovanou odstávku provozu. Pro třífázové vedení je použit vícežilový kabel, který se v případě nepřipustného svodu kteréhokoliv vodiče musí celý vyměnit. Proto není nutné rozlišovat, který z vodičů svod způsobuje.

4.3.1 Blokové schéma

Bloky, na kterých závisí jiskrová bezpečnost, jsou vyznačeny žlutě. Části, které budou s modulem spojeny, ale nejsou jeho součástí, jsou vyznačeny slabě.

UTAJENO

Obrázek 20 - Blokové schéma měření izolačního stavu

Napájecí blok bude podobně, jako u měření pozistoru vybaven napěťovými ochranami, které zajistí definované maximální výstupní napětí. Na výstupu pak bude ochranný odpor, který zajistí definovaný maximální výstupní proud. Na rozdíl od předchozího modulu zde bude napětí dvoustupňově stabilizováno na 15 V pro měření a 5 V pro napájení mikrokontroléru a A/D převodníku. Je to z toho důvodu, že měřený izolační odpor bude velmi vysoký a pro lepší rozlišitelnost změn musí být napětí co nejvyšší. Na druhé straně je však napětí omezeno dostupnými součástkami a požadavkem na co nejmenší fyzické rozměry modulu. Nejvyšší napětí běžně prodáváných napěťových stabilizátorů je 15 V. Pokud bych zvolil vyšší měřicí napětí, musela by se stabilizace napájení řešit složitěji. Zároveň by rostly normami definované požadavky na izolační vzdálenosti u desky plošných spojů. Obojí by vedlo k nárůstu fyzické velikosti a ceny modulu.

Měření bude realizováno proudově pomocí snímacího rezistoru pevné hodnoty. Především z důvodu úspory místa. Takové měření je však silně zatíženo nelineárním

průběhem napětí na snímacím rezistoru. Měřený rozsah odporu navíc bude 1 kΩ - 10 MΩ (bude vysvětleno). Proto bude zvolen externí převodník s větším rozlišením, než má převodník v mikrokontroléru. Zadavateli postačuje relativní rozlišení do **1 % z měřené hodnoty**, což by měla být dosažitelná hodnota. Hlavním úkolem tohoto měření je **sledování trendu odporu v čase**.

U tohoto měření bude napětí snímáno na konstantním vstupním odporu. Ve skutečnosti se tedy jedná o měření proudu.

Měřené napětí bude chráněno proti přepětí a přes filtr druhého řádu přivedeno na vstupy A/D převodníku. Filtr musí být nastaven tak, aby bylo možné dostatečně rychle vyhodnotit kritický stav, ale zároveň tak, aby zamezil chybným vyhodnocením vlivem rušení. Data z převodníku budou stejně, jako tomu bylo u předchozího modulu, mikrokontrolérem odeslána sériovou linkou do komunikační části zařízení. Ta bude opět galvanicky oddělena pomocí optočlenu odpovídajícího požadavkům norem pro jiskrovou bezpečnost.

4.3.2 Elektrické schéma

V této kapitole provedu rozbor napájecích obvodů a měřicích obvodů modulu pro měření izolačního stavu. Část s mikrokontrolérem bude v podstatě shodná s předchozím modulem, proto není nutný její rozbor.

Stabilizace napájení

UTAJENO

Obrázek 21- Napájecí obvody modulu pro měření izolačního stavu

Vzhledem k tomu, že izolační odpor dosahuje z pravidla velmi vysokých hodnot, jsem se při rozvaze napájení snažil využít co nejvyššího měřicího napětí. Jak jsem již zmínil v kapitole s blokovým schématem, jedním důvodem pro volbu napětí 15 V je dostupnost regulátorů napětí. Druhým, řekl bych hlavním důvodem, je výsledek hledání kompromisu mezi počtem součástek tvořících napěťovou ochranu a volbou pojistky.

Hledám nejvyšší hodnotu Zenerova napětí diody v řetězci. V tomto případě tedy začnu, na rozdíl od předchozího modulu, od druhého konce. Norma 60079-11 považuje za trvalý proud pojistkou 1,7 násobek její jmenovité hodnoty. Pokud tedy hodlám použít 50 mA pojistku, musím uvažovat maximální proud

$$I_F = 50 * 1,7 = 85 \text{ [mA]} \quad (5)$$

Pomocí tohoto proudu dále odvodím maximální přípustné závěrné napětí jedné diody v řetězci. Diody vybírám z řady SMBJ53xxB, která má největší výkonovou zatížitelnost z běžně vyráběných Zenerových diod pro povrchovou montáž.

Jak jsem již zmínil dříve, zadavatel požaduje schopnost zařízení pracovat při teplotě okolí až 80 °C, při této teplotě mají diody řady SMBJ53xxB deklarovanou zatížitelnost $P_{ZDmax} = 0,75 \text{ W}$. Norma pak vyžaduje, aby součástky, na kterých závisí jiskrová bezpečnost, nebyly zatíženy na více než dvě třetiny jejich deklarovaných parametrů. Z tohoto požadavku vychází koeficient s hodnotou 1,5. [12][3]

Maximální závěrné napětí jedné diody v řetězci je tedy

$$U_{ZDm80} = \frac{P_{ZDmax}}{1,5 * I_F} = 5,882 \text{ [V]} \quad (6)$$

Nejbližší dioda z řady je SMBJ5339B se závěrným napětím 5,6 V. Při toleranci 5 % má taková dioda maximální Zenerovo napětí

$$U_{Zmax} = U_Z * 1,05 = 5,880 \text{ [V]} \quad (7)$$

Zde by ovšem mohlo být namítnuto, že Zenerovo napětí se mění i vlivem teploty. **Podle normy 60079-11 se však změna závěrného napětí diod vlivem teploty neuvažuje, postačuje uvážení tolerancí udaných výrobcem. [3]**

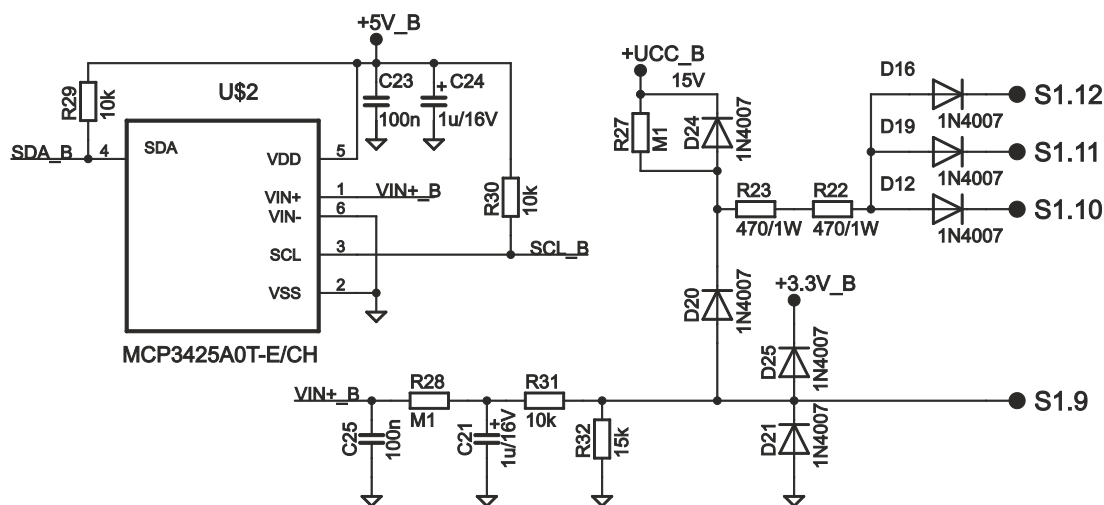
Použití této diody je tedy sice na hraně požadavků, ale i při úvaze nejméně příznivých jevů je možné.

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že pro konstrukci napěťových ochran z diod řady SMBJ53xx je při použití 50 mA pojistky nutné volit diody se závěrným napětím 5,6 V a nižším. Paralelní dělení výkonu mezi diodami nelze uvažovat z důvodu možných odchylek závěrného napětí.

V tomto případě tedy bude také z prostorových důvodů řetězec tvořen třemi Zenerovými diodami. Vzhledem k tomu, že **norma 60079-11 dále uvažuje s jednou možnou poruchou Zenerovy diody v takovémto druhu ochrany**, řetězec musí být zdvojen. Pro zajištění větší bezpečnosti jsem dále propojil uzly jednotlivých řetězců, norma to však nevyžaduje.

Dalšími součástkami jsou lineární stabilizátory napětí L78M15 a LE50CD, který jsem použil již v předchozím modulu. Oba stabilizátory jsou doplněny o stabilizační kondenzátory, které jsou odvozeny od požadavků uvedených v datových listech. Zařadil jsem také další filtrační kondenzátory pro případ, kdy by byla stabilizace nedostatečná vlivem špičkových odběrů. Ty mohou být způsobeny například komunikací mikrokontroléru.

Měřicí obvody

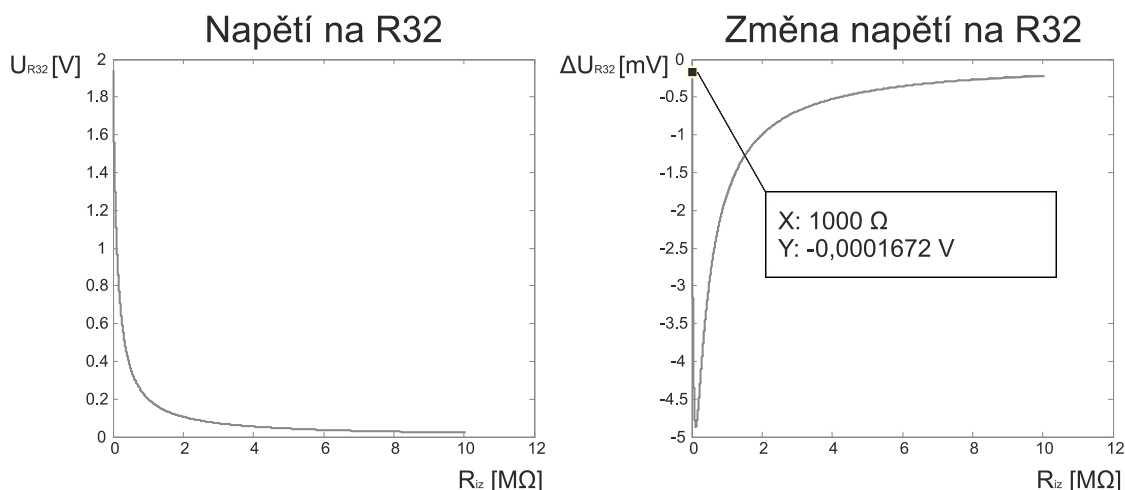


Obrázek 22 - Měřicí obvody modulu pro měření izolačního stavu

Jak jsem již uvedl dříve, měření bude probíhat napěťově, přičemž odpor vedení bude omezovat výstupní proud a tím ovlivní úbytek napětí na vstupním, snímacím, rezistoru. Při nízkých hodnotách měřeného odporu se projeví vnitřní odpor modulu, který je poměrně vysoký a přidání odporu malých hodnot tak výstupní proud ovlivní jen minimálně.

Vzhledem k tomu, že zadavatel požaduje rozlišení přibližně 1 % z měřené hodnoty, zvolil jsem 16 bitový A/D převodník. Ten bude komunikovat po sběrnici I²C.

Zvolený převodník má vstupní napěťový rozsah 2,048 V, vstupní rezistor jsem proto nastavil tak, aby bylo měřené napětí v tomto rozsahu. Při nulovém měřeném odporu a napájecím napětí 15 V bude na rezistoru R32 napětí maximálně 1,957 V.



Obrázek 23 - Průběhy napětí na měřeném rezistoru

Na obrázku je vidět průběh napětí na rezistoru R32 při měřeném odporu 1 kΩ - 10 MΩ. Na druhém průběhu jsou vykresleny změny napětí na R32, při krokové změně měřené veličiny vždy o 1 %. Vyznačený bod představuje nejmenší napěťovou změnu.

Problémem tohoto zapojení je konstantní vnitřní odpor 100 k Ω , který je tvořen rezistorem R27. Ten způsobuje velmi malou citlivost v oblasti měřeného odporu přibližně do 1 k Ω . Je tomu tak protože změna odporu v řádu desítek ohmů je proti vnitřnímu odporu zanedbatelná a na měřeném odporu se projeví jen malou změnou napětí. Tento jev je vidět na druhém průběhu v obrázku.

Z tohoto důvodu jsem se shodl se zadavatelem na rozsahu měření od 1 k Ω . Při této hodnotě jsou již změny měřeného napětí při 1 % změně připojeného odporu větší než 5 kvantizačních úrovní použitého A/D převodníku (1 kvantizační krok je $2,048 \text{ V}/2^{16} = 3,125 \cdot 10^{-5} \text{ V}$). V teoretické rovině bez uvážení zdrojů nejistot jsou takové změny rozlišitelné.

Vstupní filtr měřeného signálu jsem použil stejný jako u modulu pro měření stavu pozistoru. Jedná se o pasivní filtr druhého řádu s mezní frekvencí 15 Hz.

Výstupní svorka je ztrojena, aby se dalo modul využít i pro měření třífázové sítě.

Přepět'ové ochrany fungují na stejném principu, jako jsem již uvedl dříve.

4.4 Měření celistvosti vedení

Posledním měřicím modulem bude měření celistvosti vedení. Cílem tohoto měření by mělo být hlídání elektrického odporu zemního vodiče v rozsahu 0-100 Ω s rozlišením 0,1 Ω a především detekce polarity sériově zapojené diody. Modul by také měl být schopen rozeznat cizí napětí na vodiči. Zvýšená hodnota odporu bude vyhodnocena řídicím mikrokontrolérem, který vyšle signál pro odpojení vedení od sítě.

V praxi bude k tomuto modulu připojen ovládací a zemnicí vodič. Na konci ovládacího vodiče bude přes přepínač připojena dioda. Na základě detekovaného směru diody a velikosti odporu se může rozhodovat například o směru otáčení motoru. V případě rozpojení nebo nebezpečně vysokého odporu zemního vodiče může dojít k účelnému, respektive bezpečnostnímu odpojení zařízení od sítě.

Měření celistvosti vedení se provádí v aplikacích využívajících frekvenční měniče pro regulaci elektromotorů. Ovládací vodič je veden v silovém napájecím kabelu, proto je vystaven velkému rušení a předpokládá se tedy potřeba účinné filtrace měřeného signálu.

4.4.1 Blokové schéma

Bloky, na kterých závisí jiskrová bezpečnost, jsou vyznačeny žlutě. Části, které budou s modulem spojeny, ale nejsou jeho součástí, jsou vyznačeny slabě.

UTAJENO

Obrázek 24 - Blokové schéma měření celistvosti

Napájecí blok bude opět podobný těm z předchozích modulů, kromě stabilizace bude opět obsahovat ochrany proti přepětí a tím zajistí definované výstupní napětí, což je jeden z důležitých parametrů jiskrové bezpečnosti. Jak jsem již zmínil dříve, toto měření bude zřejmě zatíženo velkým rušením, a proto je žádoucí, aby měřicí napětí bylo dostatečně vysoké. Z tohoto důvodu bude stabilizace opět dvoustupňová, tedy na 5 V a 15 V pro generování měřicího napětí. To je hodnota, která by měla zajistit dostatečný odstup signálu od šumu. Vyšší napětí by bylo zbytečné a omezovalo by výběr součástek pro generátor harmonického signálu.

Měřicí signál bude generován mikrokontrolérem. První rozvahy vedly k využití obdélníkového průběhu, to však bylo zavrženo, neboť připojené vedení bude dlouhé a docházelo by k nedeterministickým deformacím signálu. Proto bude zvoleno harmonické napětí, které bude generováno pomocí pulzně-šířkové modulace a následně analogově demodulováno a zesíleno na požadovanou hodnotu.

Z důvodu dodržení jiskrové bezpečnosti bude před výstupy zařazen ochranný odpor.

Ten spolu s napěťovými ochranami v napájecím bloku definuje další z důležitých parametrů modulu, totiž definovaný maximální výstupní proud.

Rezistor tvořící ochranný odpor bude zároveň využit pro snímání měřeného signálu a ochranu obvodů v provozním stavu. Spolu s dalšími součástkami tedy bude tvořit i vstupní ochrany modulu. Signál bude snímán na obou stranách rezistoru, tím se umožní rozlišení směru připojené diody.

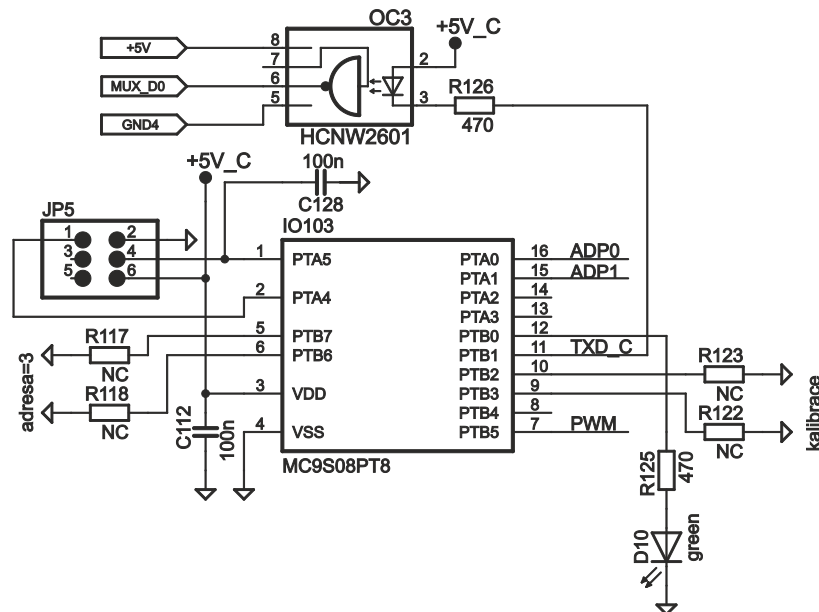
Měřený signál bude opět filtrován, na rozdíl od předchozích modulů se zde však očekává velké rušení přenesené z výkonových žil kabelu a zároveň z nosné frekvence pulzně-šířkové modulace. Z tohoto důvodu bude využit aktivní filtr třetího řádu s velkou strmostí za frekvencí měřicího signálu a malým útlumem v požadovaném pásmu.

Mikrokontrolér tohoto modulu tedy bude generovat měřicí signál, měřit dvě veličiny (napětí před a za snímacím rezistorem) a tyto bude odesílat do řídicí části zařízení.

4.4.2 Elektrické schéma

V této kapitole se budu věnovat rozboru měřicích obvodů modulu pro měření celistvosti. Zapojení napájecí části bude včetně bloku napěťových ochran shodné s předchozím modulem.

Mikrokontrolér



Mikrokontrolér tohoto modulu bude využit pro generování střídavého napětí pomocí pulzně-šířkové modulace na pinu PTB5. Zároveň bude využit jeho interní A/D převodník pro měření dvou napětí, která byla popsána dříve. Mikrokontrolér bude stejně, jako v případě předchozích modulů, odesílat naměřená data do řídicí části zařízení pomocí optočlenu, který zajistí jeho galvanické oddělení a izolaci dle požadavků norem.

UTAJENO

Obrázek 25 - Měřicí obvody pro měření celistvosti

Tento modul má za úkol rozpoznat přítomnost diody v okruhu a její směr, navíc musí s poměrně velkou přesností $0,1 \Omega$ měřit odpor vedení. Pro tento účel je tedy zapotřebí střídat polaritu měřicího signálu tak, aby se projevila blokuující vlastnost diody. V počátku jsem zvažoval použití obdélníkového průběhu měřicího signálu generovaného pomocí H můstku, po konzultaci se zadavatelem jsem však zjistil, že to není možné, neboť by na dlouhém vedení připojeném k modulu docházelo k nepředvídatelným deformacím tohoto signálu. Použití H můstku pro generování harmonického signálu se také nejevilo jako příliš vhodné kvůli nutnosti dodržení mrtvé doby spínání tranzistorů. Zadavatel práce mi doporučil použití střídače tvořeného z invertujícího a neinvertujícího zesilovače. Toto zapojení se jeví jako velmi vhodné pro tento účel, proto jsem jej využil.

Prvním krokem při návrhu této části modulu byl návrh filtru pro demodulaci pulzně-širokově modulovaného harmonického signálu z mikrokontroléru. Frekvence tohoto přenosového signálu bude 1 kHz, zatímco frekvence modulovaného měřicího signálu bude 50 Hz. Pro demodulaci tedy postačí filtr typu dolní propust. Zvolil jsem filtr druhého řádu s mezní frekvencí přibližně 150 Hz. Takový filtr má minimální útlum při frekvenci 50 Hz a poměrně velký útlum frekvence přenosového signálu. Při návrhu

jsem postupoval způsobem, který jsem vysvětlil v předchozích kapitolách a v teoretickém úvodu práce.

Jak jsem již psal v předchozí kapitole, pro dosažení dostatečného odstupu od šumu jsem se rozhodl maximálně využít dostupného napájecího napětí. Proto jsem zvolil střídač napětí, díky kterému lze dosáhnout měřicího signálu s amplitudou téměř rovnou napájecímu stejnosměrnému napětí. Princip využívá plovoucích výstupních svorek, přičemž při vrcholových hodnotách měřicího signálu je vždy jedna svorka přizemněna a druhá připojena k napájecímu napětí. Toho je docíleno generováním dvou fázově posunutých, ale jinak shodných harmonických signálů.

Napětí signálu vycházejícího z filtru je přibližně v rozmezí 0–5 V, což vychází z napájecího napětí mikrokontroléru, který zajišťuje pulzně-šířkovou modulaci. Tento signál vstupuje do neinvertujícího vstupu prvního operačního zesilovače, který signál zesiluje přibližně 2,8 krát. Zesílený signál tedy bude mít mezivrcholovou hodnotu napětí blízkou napájecímu, zesílení je však záměrně o něco nižší, aby se předešlo problémům se saturací zesílení.

Z výstupního signálu prvního operačního zesilovače se dále přes další filtr druhého řádu odfiltruje stejnosměrná složka tohoto signálu. Ta slouží jako referenční hodnota dalšího operačního zesilovače, který je v invertujícím zapojení s jednotkovým zesílením. Na invertující vstup je připojen výstupní signál prvního zesilovače. Tím je zajištěno, že budou oba signály vždy fázově posunuty o 180° a jejich střední hodnota bude stejná. Na výstupních svorkách takto získám harmonické napětí s amplitudou blízkou 15 V (fáze generovaných signálů se na svorkách střídají).

Jako operační zesilovač pro generátor měřicího napětí jsem zvolil typ AD8666ARZ. Tento operační zesilovač je vhodný pro jeho široké rozpětí napájecího napětí a takzvaný rail-to-rail výstup, který umožňuje, aby bylo výstupní napětí blízké napájecímu.

Signál bude měřen jako proud na jedné části bezpečnostního odporu, jehož význam jsem vysvětlil v předchozích kapitolách. Mikrokontrolér bude vyhodnocovat rozdíl středních hodnot napětí vzorkovaného na dvou jeho vstupech. Tím se snadno rozliší velikost a směr měřeného proudu, z čehož se dále vypočítá odpor vedení.

Oba snímané průběhy budou filtrovány aktivním filtrem třetího řádu s velkou strmostí útlumu na frekvencích mimo oblast zájmu. Filtr je navržen pomocí online návrhové aplikace jako Čebyševův filtr. Kvůli zvlnění před zlomem na frekvenční charakteristice takového filtru byla zvolena mezní frekvence 250 Hz. Součástky jsou zvoleny tak, aby bylo možné použít kondenzátory nízkých hodnot, které mají minimální teplotní závislost.

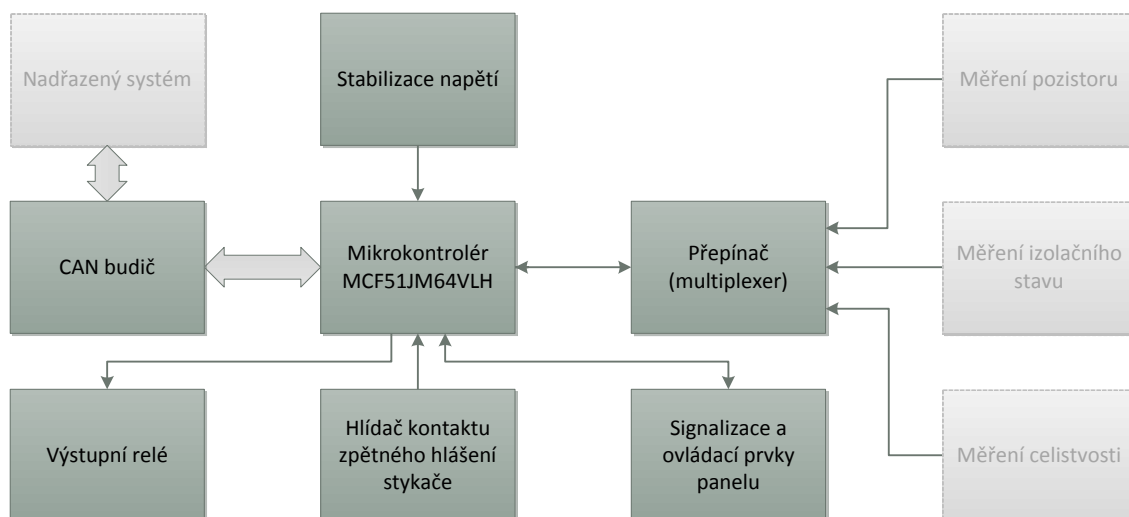
Pro zajištění napěťové kompatibility jsem zvolil operační zesilovač AD8602ARZ, který bude napájen z napětí 5 V, takže při saturaci nedojde k překročení vstupních parametrů mikrokontroléru. Jedná se opět o zesilovač s výstupem typu rail-to-rail.

Napájecí vstupy operačních zesilovačů jsou blokovány kondenzátory.

4.5 Komunikační část

Tato podkapitola se bude věnovat popisu funkce komunikační a řídicí části. Jako jediná nebude tato část spojena s výbušným prostředím. Jejím primárním účelem je sběr dat z měřicích modulů, jejich zpracování a vyhodnocení. Získaná data bude odesílat nadřazenému systému pomocí sběrnice CAN. Od nadřazeného systému také bude schopna získat požadované parametry měřených veličin, na základě kterých bude schopna ovládat výstupní relé, kterým se dále může ovládat stykač motoru a podobně. Ovládání stykače bude také závislé na stavu kontaktu zpětného hlášení. Proto zde bude také obvod pro hlídání tohoto kontaktu.

4.5.1 Blokové schéma



Obrázek 26 - Blokové schéma komunikační části zařízení

Napájecí blok bude stabilizovat napětí na jedinou hodnotu 5 V, což je napětí potřebné pro provoz mikrokontroléru a dostatečné pro doprovodné obvody.

Zásadní komponentou této části zařízení bude mikrokontrolér. Ten se od těch, které byly použity v předchozích modulech, liší především výpočetním výkonem, počtem vstupů a výstupů a podporou komunikačního protokolu CAN.

Pro komunikaci pomocí protokolu CAN je však zapotřebí speciálního budiče, který potřebným způsobem upraví napěťovou logiku. Budič CAN by v ideálním případě měl být galvanicky oddělený tak, aby se předešlo možnému ovlivnění mikrokontroléru rušením z komunikačního vedení. Je však pravděpodobné, že se od tohoto požadavku bude muset ustoupit z prostorových důvodů.

Vzhledem k tomu, že komunikace mezi moduly bude pouze jednosměrná, nemůže kontrolér ovlivnit průběh vysílání dat z modulů. Moduly svá data budou vysílat cyklicky a kontrolér bude pomocí multiplexeru přepínat, kterému z modulů bude zrovna naslouchat. Každý z modulů však bude svou zprávu vysílat s různým zpožděním po startu. Tím by se měla minimalizovat ztráta informace.

Na základě vyhodnocení naměřených hodnot z měřicích modulů a jejich porovnání s nastavenými parametry bude ovládáno výstupní relé. To v praxi bude ovládat výkonový stykač připojený k (měřenému) silovému vedení.

Sepnutí stykače bude kontrolováno pomocí hlídání kontaktu zpětného hlášení stykače. Ten bude opět galvanicky oddělen. Tím se omezí nežádoucí vlivy rušení.

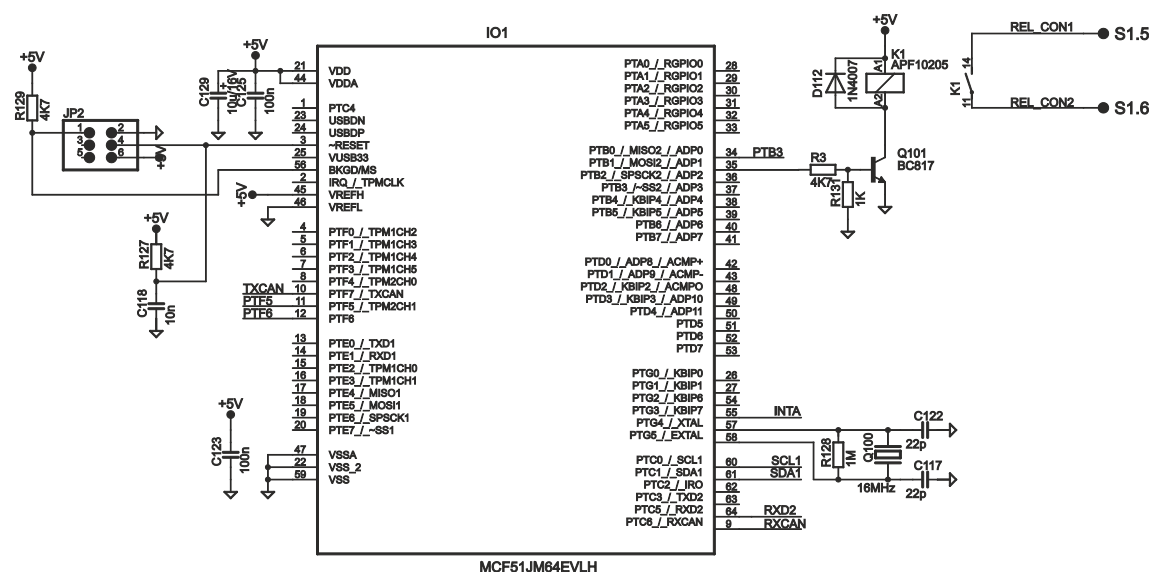
Funkčnost zařízení bude indikována signálkami na panelu. Ponesou informaci o přítomném napájecím napětí, stavu komunikace CAN, stavu výstupního relé a chybě dat z některého z měřicích modulů.

Na předním panelu zařízení budou také nastavovací prvky. Budou sloužit k nastavení komunikační adresy zařízení a k nastavení funkce relé. Ta může být následující:

- Relé je trvale vypnuto
- Relé spíná při splnění podmínek podle parametrů zadaných po komunikaci
- Relé spíná při splnění podmínek podle interních pevných parametrů
- Relé je řízeno pouze po komunikaci

4.5.2 Elektrické schéma

Řídicí mikrokontrolér



Obrázek 27 - Schéma zapojení řídicího mikrokontroléru

V této části je použitý mikrokontrolér MCF51JM64EVLH, který je mnohem výkonnější než mikrokontroléry použité v měřicích modulech. Má také mnohem více vstupů a výstupů. Další výhodou je přítomnost řadiče pro komunikaci pomocí CAN.

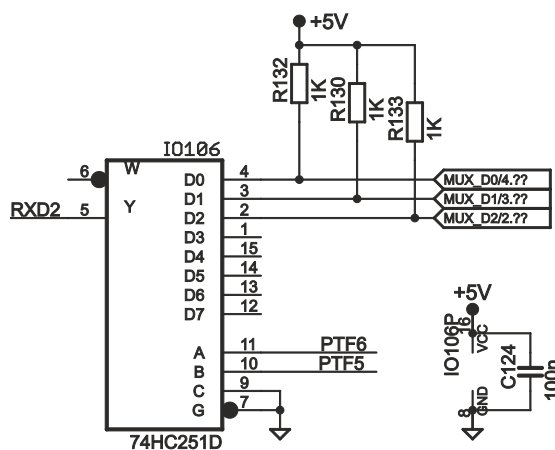
Napájení mikrokontroléru zajišťuje prostý stabilizátor napětí 78M05 na 5 V, podobně tomu bylo i u mikrokontrolérů v předchozích modulech. Zapojení tohoto stabilizátoru není nijak zvláštní, je pouze doplněn o stabilizační kondenzátory, proto jej zde nebudu dále rozebírat.

Kromě kondenzátorů doporučených v datovém listu budou k mikrokontroléru připojeny různé periferie. Některé z nich jsou vyobrazeny na schématu výše. Jedná se o programovací rozhraní, externí krystal a výstupní relé.

Externí krystal jsem zvolil po konzultaci se zadavatelem z důvodu potřeby přesného časování pro komunikaci pomocí sběrnice CAN.

Výstupní relé bude sériově zařazeno ve smyčce ovládající stykač silového vedení, tím bude umožněno, aby zařízení bylo schopné odpojit vedení od napětí v případě vyhodnocení kritického stavu.

Přepínač vstupů



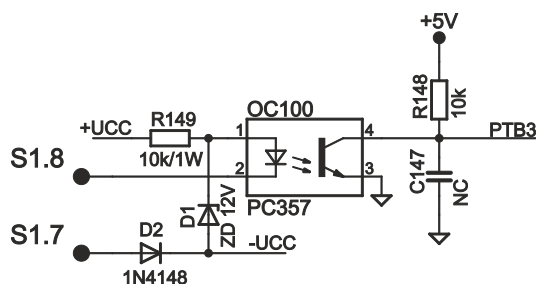
Obrázek 28 - Zapojení multiplexeru

Princip vyčítání naměřených dat jsem již popsal v předchozích částech práce. Řídící mikrokontrolér bude cyklicky přepínat mezi výstupy jednotlivých měřicích modulů. K tomu jsem využil multiplexer. Vstupy multiplexeru budou připojeny k výstupním optočlenům jednotlivých měřicích modulů. Vzhledem k nedostatečnému výběru nabízených součástek tohoto druhu jsem zvolil multiplexer 74HC251D, který má osm vstupů. Tento typ je také snadno dostupný a levný.

Vzhledem k tomu, že budou využity pouze tři vstupy, adresovací bit s největší vahou jsem přizemnil. Mikrokontrolér tak bude schopen adresovat vstupy 1 až 4. Výstup multiplexeru bude připojen ke vstupu sériové komunikace mikrokontroléru.

Napájecí piny jsou doplněny o blokovací kondenzátor.

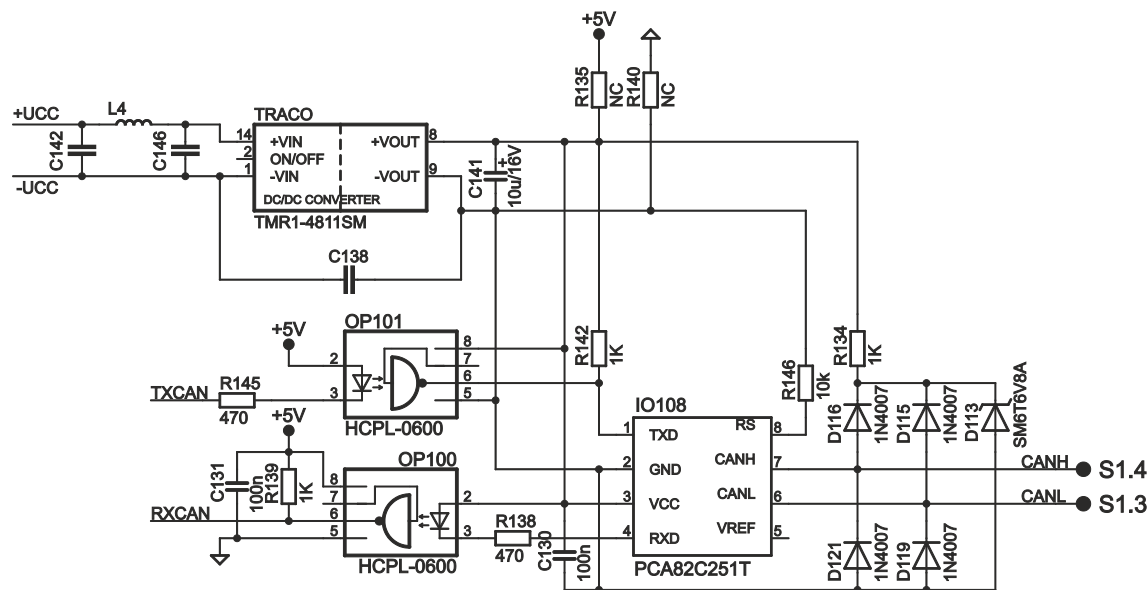
Hlídač zpětného hlášení stykače



Obrázek 29 - Zapojení hlídače zpětného hlášení

Stykač silového vedení má bezpotenciálový kontakt, jehož propojení je zapotřebí hlídat. Lze tím zjistit, zda skutečně došlo k žádanému rozpojení nebo sepnutí stykače. Aby se předešlo přenosu rušení nebo přepětí do elektroniky komunikačního modulu, bude okruh napájen z napětí, které bude zároveň napájet celé zařízení a uzavřený obvod bude detekován pomocí optočlenu. Vzhledem k tomu, že v některých aplikacích bude okruh zpětného hlášení uzavírat tranzistor, který by mohl být výstupním napětím zničen, je zde zařazena také Zenerova dioda s rezistorem, která zajistí, že výstupní napětí nepřekročí 12 V. Výstup optočlenu pak bude přiveden do řídicího mikrokontroléru.

Budič CAN

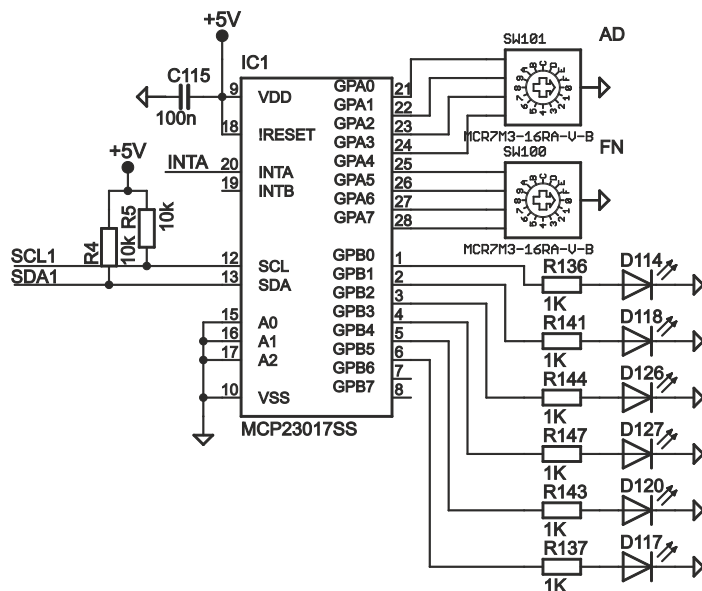


Obrázek 30 - Schéma zapojení budiče CAN

Poslední částí komunikačního bloku je budič sběrnice CAN. Jak jsem již uvedl dříve, řídicí mikrokontrolér je sice vybaven řadičem CAN, ten však neimplementuje fyzickou vrstvu rozhraní. Proto je v modulu zařazen budič PCA82C251T. Tento obvod jsem opět vybral, neboť firma s ním má zkušenost a používá jej i v jiných výrobcích. Schéma zobrazuje zapojení, které je galvanicky odděleno od řídicí části. Toho je docíleno pomocí DC/DC měniče TMR-4811SM a dvou optočlenů.

Vstupní svorky jsou doplněny o přepět'ové ochrany tvořené diodami spojenými s TVS diodou (transilem). V případě přepětí se smyčka uzavře právě přes tento transil, kde se přebytečná energie promění v teplo.

Externí uživatelský panel



Obrázek 31 – Schéma externího uživatelského panelu

Z prostorových důvodů jsem byl donucen umístit ovládací prvky a signálky na externí panel. Abych předešel složitému kontaktování mnoha vodičů a ušetřil místo, umístil jsem na panel expandér vstupně/výstupních portů. Jedná se o typ MCP23017SS, který bude ovládán hlavním mikrokontrolérem po sběrnici I²C.

Přepínač funkce bude sloužit především k přepínání sady parametrů pro vyhodnocení stavu měření a k přepnutí mezi automatickým režimem rozpínání relé nebo vzdáleným. Signálky budou signalizovat správnou funkci řídicího kontroléru, komunikace a správnost měřených dat.

4.6 Napájecí zdroj

Pro napájení zařízení použiji standardní zdroj, který firma používá i v jiných typech výrobků. Jedná se spínaný zdroj typu FLYBACK. Konstrukce je ověřená a funkční, novým návrhem jsem se tedy nezabýval. Pro tento zdroj platí blokové schéma a informace uvedené v kapitole 3.3.

4.6.1 Elektrické schéma

UTAJENO

Obrázek 32 - Předběžné schéma napájecího zdroje

Zadavatel požaduje rozsah napájecího napětí zařízení = 20 V až ~ 42 V s tolerancí + 25 %. Jednotlivé moduly od sebe musí být galvanicky odděleny a každý klade jiné požadavky na napájecí napětí. Z tohoto důvodu bude zvolen spínaný zdroj s několika oddělenými sekundárními vinutími. Vstupní napětí bude usměrněno a vyhlazeno. Regulaci spínání bude řešit některý z běžně dostupných řídicích obvodů pro spínané zdroje. Vzhledem ke zkušenostem firmy s obvody z řady TOPswitch, použiji typ TOP412G, který je vhodný pro požadovaný rozsah napájecích napětí.

Zpětná vazba regulační smyčky bude tvořena dalším vinutím transformátoru. Tato varianta sice neumožňuje příliš přesnou regulaci, ale vzhledem k tomu, že každý modul bude obsahovat stabilizační obvody, to nebude vadit. Výhodou je značná úspora místa. Speciální požadavky se vztahují na konstrukci transformátoru. Ten musí mít dostatečnou izolační pevnost a musí splňovat požadavky norem jiskrové bezpečnosti.

5 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ

Pro zprovoznění zařízení bylo zapotřebí vytvořit software pro mikrokontrolér každého modulu. Při vývoji softwaru jsem se rozhodl vyzkoušet nástroj Processor Expert, který jsem popisoval již dříve. Tento systém usnadňuje vývoj díky možnosti využití *komponent*, které představují periferie mikrokontroléru. Komponenty vložené do projektu lze konfigurovat pomocí tabulek. V závislosti na konfiguraci pak Processor Expert vygeneruje *metody*, které lze používat v kódu pro ovládání daných periférií nebo využívání jejich funkcí, jako jsou například přerušování.

Popsaný způsob vývoje softwaru se jeví jako velmi výhodný, v průběhu práce jsem se však přesvědčil, že systém zatím není dokonalý a nelze se na něj zcela spolehnout.

V této kapitole nejdříve objasním požadavky na funkci programů a později provedu v jednotlivých kapitolách rozbor programu každého z modulů.

Podrobný rozbor kódu v práci nepovažuji za přínosný. V podkapitolách programů proto popíši funkci a vystihnu podstatu jednotlivých částí programu, které jsem vytvořil. Konkrétní implementaci daných částí lze v případě zájmu dohledat v projektech na přiloženém CD.

5.1 Popis funkce programů

Zařízení se skládá ze tří modulů a jedné vyhodnocovací části, která má za úkol sbírat naměřená data z ostatních modulů a vyhodnocovat vstupy zařízení. Na základě jejich vyhodnocení pak má indikovat stav modulů a ovládat výstupní reléový kontakt.

Po zapnutí zařízení má dojít k inicializaci každé komponenty a signalizaci správné, popřípadě nesprávné funkce některé části zařízení. Každý z měřicích modulů je vybaven signálkou, kterou se po zapnutí blikáním identifikuje pracovníkovi, který bude zařízení oživovat. Počet bliknutí je shodný s adresou zařízení, což je identifikátor, který je pevně definován v programu.

Adresy modulů jsou následující:

1. Modul pro měření pozistoru
2. Modul pro měření izolačního stavu
3. Modu pro měření celistvosti vedení

Stejný identifikátor je pak použit ve zprávách, které jsou odesílány do vyhodnocovací části. Jak jsem již zmínil dříve, zprávy z modulů jsou periodicky odesílány jednosměrnou sériovou komunikací pomocí rozhraní UART.

Mikrokontrolér vyhodnocovací části, který disponuje pouze dvěma hardwarovými rozhraními UART pak cyklicky přepíná multiplexer tak, aby byl schopen postupně vyčíst data ze všech modulů. Jeden cyklus vyčítání dat ze všech modulů by neměl trvat déle než 100 ms.

Pro zprávy s naměřenými daty jsem definoval jednoduchý tvar, každá zpráva se skládá z jednoho bytu adresy, čtyř bytů naměřených dat a jednoho bytu kontrolního součtu vytvořeného pomocí logické funkce XOR ze všech předchozích dat. Vzhledem k charakteru použitého rozhraní UART jsou data odesílána po jednotlivých bytech. Řídící mikrokontrolér tedy musí zprávu sestavit z dílčích částí a ověřit její integritu. Datová zpráva je znázorněna v tabulce.

Byte	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Obsah	Adresa modulu	Data				Kontrolní součet

Tabulka 2 – Kompletní zpráva s naměřenými daty

5.2 Program modulu pro měření pozistoru

Tento modul má v porovnání s ostatními nejjednodušší software. Je to především díky tomu, že v tomto modulu nejsou pro měření použity žádné externí periferie. Program tohoto modulu jsem tedy použil jako výchozí pro vývoj softwaru ostatních modulů.

Pro program modulu pro měření pozistoru jsem vytvořil knihovny, které obsahují metody související s logickými částmi programu. Tyto metody implementují dílčí úkony potřebné pro spolupráci s periferiemi a jinými částmi programu

5.2.1 Konfigurace mikrokontroléru

Pro měření veličiny je zde využit interní A/D převodník mikrokontroléru. Pro odesílání dat je využito rozhraní UART. Pro signalizaci blikáním je použit vnitřní časovač s možností vyvolání přerušení a výstupní pin mikrokontroléru.

Na začátku jsem vytvořil odpovídající konfiguraci vybráním komponent pomocí systému Processor Expert a jejich nastavením pomocí tabulek. Rozlišení A/D převodníku jsem nastavil na maximální možné, tedy 12 bitů. Interval časovače, který je zapnut v cyklickém režimu, jsem nastavil na přibližně 16 ms. Přerušení tohoto časovače využívám pro iniciaci odesílání dat přes rozhraní UART. Toto rozhraní jsem nastavil jako jednosměrné s rychlostí 19200 baud/s a přenosem 8 bitů bez parity a s jedním stop bitem.

5.2.2 Knihovna adc.h

Tato knihovna slouží pro získání dat z registrů integrovaného A/D převodníku a zpřístupnění těchto dat jiným částem programu skrze ukazatel na globální proměnnou, kde je ukládá. V programu využívám přerušení převodníku po dokončení převodu, kde spouštím převod nový.

5.2.3 Knihovna `led_signal.h`

Tato knihovna obsahuje metody pro ovládání signálky. Je využita v inicializační části programu, kde se využívá pro signalizaci adresy modulu. Počítám také s jejím možným využitím do budoucna. Proto je napsána tak, aby byla maximálně nenáročná na výpočetní čas procesoru. K tomu využívá přerušení časovače, který po dokončení požadavku na blikání vypne a umožní tak jeho použití k jiným účelům dále v programu. Knihovna využívá návěstí, díky kterému se předejde opětovnému blikání v tomto případě.

5.2.4 Knihovna `uart_pe.h`

Tato knihovna slouží k odesílání naměřených dat v předem definovaném tvaru zpráv, který jsem popsal v kapitole popisující softwarovou funkci zařízení.

Odesílání je zde řešeno stavovým automatem, který zajistí odeslání dat v požadovaném pořadí.

Počítal jsem s voláním metody pro odesílání z hlavní programové rutiny. Obdobně, jako tomu bylo u předchozí knihovny, i tato obsahuje návěstí, kterým lze vysílání zastavit.

Toto návěstí je v programu ovládáno z přerušení časovače. Díky tomu je minimalizován provoz na rozhraní UART a zároveň minimalizován počet strojových cyklů, strávených v přerušení. Jak jsem již zmínil dříve, řídicí mikrokontrolér data vyčítá přibližně co 20 ms. V programu tedy zapínám vysílání časovačem s periodou 16 ms.

5.2.5 Hlavní smyčka programu - `program.h`

V hlavní smyčce programu je volána funkce z této knihovny, která hlavní smyčku v podstatě nahrazuje. Implementoval jsem zde stavový automat, který disponuje dvěma stavy pro inicializaci, jedním stavem vyhrazeným pro normální běh programu a jedním chybovým stavem.

První stav slouží pro jednorázovou inicializaci a druhý lze využít pro cyklickou inicializaci. To se hodí pro případ, kdy se čeká na dokončení operace. Příkladem v mém programu může být například konfigurace A/D převodníku v prvním stavu a prvotní blikání signálkou, kdy se čeká na vypnutí (dokončení) procesu blikání, ve stavu druhém. Ve stavu určeném pro hlavní rutinu je voláno vysílání UART zprávy (v závislosti na návěstí nemusí být provedeno).

5.3 Program modulu pro měření izolačního stavu

Program tohoto modulu se od předchozího liší především využitím rozhraní I²C pro komunikaci s přesnějším externím A/D převodníkem.

Při návrhu softwaru jsem využil knihovny modulu pro měření pozistoru. Vzhledem k tomu, že zde není využit interní A/D převodník, musel jsem přepracovat knihovnu `adc.h` tak, abych byl schopen získat data z externího převodníku. Kromě zmíněné

knihovny a její inicializace v hlavním stavovém automatu se program shoduje s tím předchozím.

5.3.1 Knihovna *adc.h*

Jak jsem již zmínil, tato knihovna je v modulu pro měření izolačního stavu přepracovaná. Její vnější funkce je však velmi podobná. Opět obsahuje metodu pro získání dat z A/D a metodu pro předání ukazatele na vyčtenou hodnotu. Navíc je zde metoda pro inicializaci A/D převodníku, která nastavuje rozhraní mikrokontroléru do režimu *master* a nastavuje adresu *slave* periferie (převodníku). Tato metoda je volána ze stavu první inicializace programu.

5.4 Program modulu pro měření celistvosti

Tento program opět vychází z programu pro měření pozistoru. Je zde také použit interní A/D převodník. Knihovna *adc.h* zde však musela být opět přepracována, neboť modul využívá dva vstupní kanály převodníku. Pro tento modul jsem dále musel vytvořit knihovnu *sine.h*, která má za úkol ovládat periferii pulzně šířkové modulace, která je využita při generování střídavého měřicího signálu.

5.4.1 Knihovna *adc.h*

Kvůli použití dvou měřicích kanálů je zapotřebí aktivovat vnitřní FIFO paměť pro ukládání výsledků A/D převodu a čísla kanálů pro záznam. FIFO paměť je zde implementována hardwarově. Postup ovládání převodníku je při jejím použití téměř shodný s jednokanálovým měřením. Rozdíl je pouze v nutnosti dvou po sobě provedených vyčteních registru s hodnotou převodu. Po prvním vyčtení se registr automaticky přepíše na hodnotu získanou z druhého kanálu.

Pro opětovné spuštění převodu je zapotřebí opětovně zapsat čísla požadovaných kanálů do FIFO paměti měřených kanálů. Postup je stejný, dvěma zápisy do registru adresy kanálu dojde k zaplnění FIFO a spuštění převodu.

Metody pro použití v programu jsou shodné, jedna slouží pro získání dat a jejich uložení, zatímco druhá vrací ukazatel na uloženou hodnotu. Rozdíl je pouze v tom, že hodnoty jsou uloženy v dvouprvkovém poli.

5.4.2 Knihovna *sine.h*

Jak jsem již zmínil v předchozích kapitolách, tento modul pro generování měřicího harmonického signálu využívá periferii pulzně šířkové modulace mikrokontroléru. Ta je v modulu dále filtrována a jinak zpracována.

Tato knihovna obsahuje tabulku stříd pulzního signálu, kterou jsem vytvořil vypočítáním funkce sinus v každé jedné setině jejího rozsahu a normalizací tohoto výsledku na rozsah 16 bitové proměnné.

Knihovna obsahuje jedinou metodu, která při každém zavolání nastaví následující střidu pulzního signálu z tabulky. Po dosažení konce tabulky pokračuje na jejím začátku. V programu je metoda volána v přerušení časovače s periodou odpovídající jedné setině periody požadovaného měřicího signálu (50 Hz).

5.5 Program řídicího mikrokontroléru

Řídicí mikrokontrolér má za úkol přepínání komunikačních vstupů z měřicích modulů pomocí multiplexeru. Dále zpracovává přijaté rámce a rekonstruuje z nich definované zprávy, ze kterých pak po ověření kontrolního součtu získá naměřená data a uloží je do vzorkovací proměnné přidružené k adrese modulu, ze kterého zpráva přišla.

Naměřená data pak vyhodnocuje a srovnává s předem vyplněnou tabulkou parametrů. Na základě srovnání pak ovládá signálky a výstupní relé. Ovládání se odvíjí také od stavu kontaktu připojeného k aktivnímu vstupu zařízení.

Mezi přednastavenými sadami parametrů pro srovnání naměřených dat lze přepínat pomocí přepínače FN na panelu.

Signálky a ovládací prvky jsou v zařízení umístěny na vzdáleném panelu a jsou připojeny k expandéru vstupně výstupních portů, který je s mikrokontrolérem spojen pomocí sběrnice I²C. Tento expandér však vyžaduje speciální způsob zápisu dat do registrů a definovaný postup pro vyčítání dat. Z tohoto důvodu nebylo možné použít jednoduché metody z modulu pro měření izolačního stavu (komunikuje také pomocí I²C), kde jsem si vystačil pouze s jednoduchým zápisem a čtením jednoho bytu.

5.5.1 Knihovna `iic_cf.h`

V případě této aplikace jsem tedy vytvořil knihovnu `iic_cf.h`, implementoval poměrně složitý algoritmus vyrovnávací paměti typu FIFO. Data, která v průběhu programu budu chtít odeslat, se nejdříve zařadí do pole a patřičně se navýší počítadlo bytů ve FIFO. Na konci hlavní smyčky je pak volána metoda řídicí tok odesílání a přijímání dat.

Zmíněný expandér v režimu, který používám, vyžaduje zápis vždy dvou bytů najednou. První byte značí adresu registru v expandéru, kam se mají zapsat data z druhého bytu. V případě čtení musí být do expandéru odeslán jeden byte s adresou registru pro vyčtení a následovat požadavek na čtení. Na následujících řádcích se pokusím popsat nejdůležitější metody

Metoda `iic_send()`

Tato metoda sleduje návěští hardwarového rozhraní I²C, návěští požadavku na příjem dat, návěští odesílání dat a počet prvků ve frontě. Na základě těchto stavů pak rozhoduje o tom, zda se bude přijímat nebo odesílat. Metoda dohlíží na pořadí odesílaných bytů a předáním parametru lze ovlivnit délku jedné zprávy odeslané na sběrnici. Tato metoda je významnou částí programu

Metoda také počítá se specifickým způsobem vyčítání dat z expandéru a v případě nastavení požadavku na příjem dat pozastaví odesílání fronty, odešle na sběrnici adresu registru v expandéru a poté naslouchá a ukládá přijatá data.

5.5.2 Knihovna `uart_pe.h`

Tato knihovna vychází z knihovny, kterou jsem představil v kapitole o programu modulu pro měření pozistoru. Pro demonstrační program jsem se rozhodl pro mírnou úpravu zařízení a místo komunikace CAN, kterou bude implementovat zadavatel práce, jsem na svorky zařízení připojil výstup rozhraní UART. Knihovna tedy zahrnuje metody pro odesílání seřazených dat i pro příjem dat z modulů.

Metoda `uart_check()`

Jedná se o jednu z významnějších metod programu. Příjem zpráv probíhá postupným posouváním pěti posledních rámců UART v pomocném poli. Po každém posunutí řady je provedeno ověření podmínky, zda platí rozsah prvního bytu 0 až 3 (adresa), zda se kontrolní součet (XOR) čtyř následujících bytů shoduje s posledním bytem. Pokud podmínka platí, je zřejmé, že se jedná o zprávu z měřicího modulu a tato zpráva je na základě její adresy uložena do pole s hodnotami

6 OZNAČENÍ A PARAMETRY

Aby mohl být výrobek uveden na trh, musí být řádně označen. Značení nese informaci o vstupních a výstupních parametrech, typové označení a výrobní číslo.

V této kapitole se budu nejdříve věnovat stanovení vstupních a výstupních parametrů jiskrově bezpečných obvodů. Poté stanovím parametry kladoucí omezení na připojené součásti a odvodím vzorce pro označení nevýbušných zařízení dle směrnice ATEX.

Zařízení bude schvalováno pro použití v dolech (skupina I) i v jiných prostorách s nebezpečím výbuchu (skupina II). Pro každou skupinu budou odvozeny vlastní parametry a vzorce.

6.1 Stanovení maximálních parametrů

Jak jsem již zmínil na začátku práce, ochrana pomocí jiskrové bezpečnosti je založena na posuzování dvou částí zařízení. Jedna část je umístěna v prostorách bez nebezpečí iniciace výbuchu, zatím co druhá je v kontaktu s výbušným prostředím.

Ochrana je založena na omezení energií, které by potenciálně mohly proniknout do kritické části zařízení. Zdrojem nebezpečných energií může být nejen samotná část systému, která je umístěna mimo prostory s nebezpečím výbuchu, ale i připojená kabeláž a zařízení, které mohou akumulovat energii. Tyto energie se v případě poruchy mohou sčítat a způsobit tak iniciaci výbuchu.

Z tohoto důvodu je zapotřebí, aby byly stanoveny maximální výstupní parametry U_o a I_o té části, která je umístěna mimo prostory s nebezpečím výbuchu. Na základě těchto parametrů se pak z tabulek a grafů uvedených v normě ČSN EN 60079-11 vyčtou hodnoty maximálních přípustných indukčností a kapacit připojených součástí. Hodnoty se liší v závislosti na plynové skupině.

Grafy jsou uvedeny zvlášť pro indukčnost a zvlášť pro kapacitu. V případě použití vyčtených hodnot se nedá zajistit, že nedojde k iniciaci vlivem sečtení energií. Hodnoty proto musí být buďto ověřeny zkoušením na přerušovači (dražší schvalování) nebo sníženy bezpečnostním koeficientem vyšším než 100. Takové hodnoty se považují za bezpečné. [3]

Při stanovení parametrů uvažuji zkoušku na přerušovači a výchozí hodnoty pro zkoušky stanovím na polovinu maximálních bezpečných (s koeficientem 1,5) hodnot z grafů a tabulek.

6.1.1 Výstupní parametry obvodu pro měření pozistoru

Při výpočtech se uvažují výstupní hodnoty za nejméně příznivých podmínek. Uvažuje se tedy nespočet nezapočitatelných a dvě započitatelné poruchy. V tomto případě je výstupní napětí omezeno Zenerovými diodami a výstupní proud rezistorem. Jedná se tedy o lineární obvod, který má výkonové maximum v polovině rozsahu obou hodnot.

Ve výpočtu jsou zahrnuty výrobní tolerance součástek, tedy 5 % pro Zenerovy diody a 1 % pro rezistory.

$$U_o = U_{Z_{max}} = 5,88 [V] \quad (8)$$

$$I_o = \frac{U_o}{(R_{R6} + R_{R10}) * 0,99} = 6,32 [mA] \quad (9)$$

$$P_o = \frac{U_o}{2} * \frac{I_o}{2} = 9,29 [mW] \quad (10)$$

Maximální parametry připojených součástí

Hodnoty kapacit jsou stanoveny pro nejnáročnější skupinu plynů IIC. Vzhledem k tomu, že jsou dostatečné (1 km kabelu má přibližně 1,2 µF), není potřeba provádět zkoušky na vyšší hodnoty pro méně náročné skupiny a stanovovat tak další parametry.

Kapacity jsem vyhledal v tabulce A.2 normy, indukčnosti pro chemické skupiny z grafu A.6 normy a pro doly z grafu A.5. [3]

Dodatek „postačuje“ znamená, že povolené hodnoty jsou velmi vysoké a zvolil jsem dostatečnou požadovanou hodnotu, která je značně menší.

Plynová skupina	Maximální C ₀ [uF]	Maximální L ₀ [mH]
IIC, IIB, IIA (chemie)	21,5	20 (postačuje)
I (doly, metan)	21,5 (postačuje)	20 (postačuje)

Tabulka 3 - Povolené parametry součástí připojených k obvodu pozistoru

6.1.2 Parametry obvodu pro měření izolačního stavu

Postup výpočtu je shodný s tím, který byl uveden u předchozího modulu. Výstupní ochrany jsou tvořeny třemi Zenerovými diodami.

$$U_o = 3 * U_{Z_{max}} = 17,64 [V] \quad (11)$$

$$I_o = \frac{U_o}{(R_{R22} + R_{R23}) * 0,99} = 18,96 [mA] \quad (12)$$

$$P_o = \frac{U_o}{2} * \frac{I_o}{2} = 27,86 [mW] \quad (13)$$

Maximální parametry připojených součástí

Také zde platí, že dodatek „postačuje“ značí hodnotu, která byla zvolena dostatečně vysoká pro požadované použití, přičemž dosahuje jen zlomku povolené hodnoty.

Plynová skupina	Maximální C ₀ [uF]	Maximální L ₀ [mH]
IIC, IIB, IIA (chemie)	0,16	20 (postačuje)
I (doly, metan)	5,3	20 (postačuje)

Tabulka 4 - Povolené parametry součástí připojených k obvodu izolačního stavu

Výstupní parametry obvodu pro měření celistvosti

Postup výpočtu je shodný s tím, který byl uveden u předchozího modulu. Výstupní ochrany jsou opět tvořeny třemi Zenerovými diodami.

$$U_o = 3 * U_{z_{max}} = 17,64 [V] \quad (14)$$

$$I_o = \frac{U_o}{(R_{R103} + R_{R106}) * 0,99} = 18,96 [mA] \quad (15)$$

$$P_o = \frac{U_o}{2} * \frac{I_o}{2} = 27,86 [mW] \quad (16)$$

Maximální parametry připojených součástí

Plynová skupina	Maximální C ₀ [uF]	Maximální L ₀ [mH]
IIC, IIB, IIA (chemie)	0,16	20 (postačuje)
I (doly, metan)	5,3	20 (postačuje)

Tabulka 5 - Povolené parametry součástí připojených k obvodu celistvosti

6.2 Odvození vzorců dle směrnice ATEX


Dalšími údaji, které musí být na zařízení uvedeny, jsou vzorce popisující způsob ochrany nevybušného zařízení a způsob a možnosti jeho instalace do výbušných prostředí. Tyto vzorce vychází z požadavků směrnice ATEX a normy ČSN EN 60079-11 a 60079-0.

Výrobek také musí být označen značkou CE, která slouží jako prohlášení, že byl výrobek vyroben ve shodě se všemi ustanoveními a požadavky směrnice ATEX. [19]

Vzorce se skládají ze dvou základních částí. Povinná část informuje o tom, že se jedná o nevybušné zařízení a o skupině a kategorii, do které je zařízení z hlediska normy

zařazeno. Druhá, doplňková, část obsahuje například informace o způsobu ochrany před výbuchem nebo o plynových skupinách.

Pro znázornění odvození vzorců jsem využil tabulky, které jsem vytvořil už ve své bakalářské práci. [21]


Povinné značení dle ATEX			
1.	2.	3.	4.
	II	(1)	G

Doplňkové značení podle norem					
4.	1.	2.	3.	4.	5.
[Ex	ia	Ga]	IIC

Povinné	1.	Obecný znak pro zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Skupina II (povrch)
	3.	Kategorie zařízení 1, závorky značí zařízení umístěné mimo zónu
	4.	Výbušná atmosféra G (plyny)

Doplňkové	1.	Označení zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Symbol použitého druhu ochrany a jeho úrovně ochrany
	3.	Informace o úrovni ochrany zařízení (dle norem IEC)
	4.	Závorky značí návazné zařízení umístěné mimo zónu
	5.	Skupina zařízení IIB - etylénová skupina

Tabulka 6 - Vzorec pro výbušnou plynnou atmosféru (chemie) [16][19][3]

Povinné značení dle ATEX		
1.	2.	3.
	I	(M1)

Doplňkové značení podle norem					
4.	1.	2.	3.	4.	5.
[Ex	ia	Ma]	I

Povinné	1.	Obecný znak pro zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Skupina I (doly)
	3.	Kategorie zařízení M1, závorky značí zařízení umístěné mimo zónu

Doplňkové	1.	Označení zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu
	2.	Symbol použitého druhu ochrany a jeho úrovně ochrany
	3.	Informace o úrovni ochrany zařízení (dle norem IEC)
	4.	Závorky značí návazné zařízení umístěné mimo zónu
	5.	Skupina zařízení I - doly s výskytem metanu

Tabulka 7 - Vzorec pro výbušnou atmosféru tvořenou prachy (doly) [16][19][3]

7 REALIZACE ZAŘÍZENÍ

V této kapitole se budu věnovat realizaci zařízení. Nejdříve popíši návrh desky plošných spojů (DPS) a konstrukci zařízení a později popíši návrh softwaru.

7.1 Výběr krabičky

Na začátku práce jsem vypsál požadavky zadavatele, které obsahují také požadavek na použití krabičky Phoenix řady ME MAX o šířce 22,5 mm nebo 45 mm. Jedná se o běžně dostupnou modulární krabičku s možností uchycení na standardizovanou lištu DIN 35. Výrobce nabízí různé varianty, které se liší především rozměry a počtem konektorů. Důležitým parametrem je také krytí podle normy IEC 60529, které z důvodu dodržení jiskrové bezpečnosti musí dosahovat alespoň úrovně IP 20.

Na této krabičce jsme se shodli, neboť nabízí poměrně velkou plochu pro desku plošných spojů. Žádoucí byla minimalizace rozměrů zařízení, proto jsem si zvolil za cíl navrhnout zařízení tak, aby se vešlo do menší z uvažovaných krabiček. Kromě velikosti jsem také musel zvolit krabičku s dostatečným počtem svorek. Konkrétní typ, který jsem zvolil, má katalogové označení:

Phoenix ME MAX 22,5 2-2 KMGY – 2713625



Obrázek 33 - Zvolená krabička Phoenix ME MAX

7.2 Návrh desky plošných spojů

Pro návrh desky plošných spojů jsem použil program Eagle od firmy Cadsoft. Při návrhu desky plošných spojů jsem musel vyhovět požadavkům na dodržení norem pro jiskrovou bezpečnost, odolnost proti rušení a úsporu místa.

Pro splnění posledních dvou uvedených požadavků jsem se rozhodl pro použití čtyřvrstvé DPS. Vnější vrstvy jsem využil pro signálové spoje, zatímco vnitřní vrstvy jsem použil pro plošný rozvod napájení pod jednotlivými obvody. Tyto plochy mají

proti běžnému vedení napájecích cest výhodu v nízké impedanci a zároveň slouží jako stínění proti elektromagnetickému rušení. Tato konfigurace také snižuje nároky na prostor díky snadno přístupnému napájení a tím odpadajícím problémům s rozvodem napájecích cest. Nevýhodou je navýšení ceny výroby takovéto DPS.

7.2.1 Izolační vzdálenosti pro jiskrovou bezpečnost

Pro dodržení norem jiskrové bezpečnosti je při návrhu desky plošných spojů důležitá především tabulka č. 5 normy ČSN EN 60079-11. Tato tabulka udává požadavky na izolační vzdálenosti v závislosti na napětí mezi

- jiskrově bezpečnými obvody a obvody, které nejsou jiskrově bezpečné, nebo
- různými jiskrově bezpečnými obvody, nebo
- obvodem a uzemněnou nebo izolovanou kovovou částí

Rozlišuje se několik druhů izolačních vzdáleností:

- Vzdušná vzdálenost
- Izolační vzdálenost přes zalévací hmotu
- Izolační vzdálenost přes pevnou izolaci
- Povrchová cesta
- Vzdálenost pod nátěrem

Zde je vhodné poznamenat, že mezi galvanicky oddělenými obvody se uvažuje taková hodnota napětí, která může vzniknout při spojení obou obvodů v libovolném místě, zjištěná například ze jmenovitých napětí obvodů. [3]

Jak je již zřejmé z předchozích kapitol, navrhované zařízení bude obsahovat celkem šest galvanicky oddělených obvodů. Z těchto obvodů budou tři jiskrově bezpečné, u těch se pak dále rozlišuje část obvodu před ochranami a část obvodu za ochranami. Nesmí se stát, že by došlo k překlenutí napěťové nebo proudové ochrany vlivem nedostatečné izolační vzdálenosti.

Jedná se tedy o obvody:

- Napájecí část zařízení (pod napětím = 20 V až ~ 42 V s tolerancí + 25 %)
- Obvody řídicí části (jmenovité napětí 12 V)
- Obvody komunikace CAN (jmenovité napětí 12 V)
- Jiskrově bezpečné obvody měření pozistoru (jmenovité napětí 12 V před ochranami, 6 V za ochranami)
- Jiskrově bezpečné obvody měření izolačního stavu (jmenovité napětí 24 V před ochranami, 18 V za ochranami)
- Jiskrově bezpečné obvody měření celistvosti (jmenovité napětí 24 V před ochranami, 18 V za ochranami)

Napětí za ochranami vychází parametrů U_{out} uvedených v předchozí kapitole

V tabulce jsem vypsal hodnoty napětíových kategorií z tabulky 5 normy ČSN EN 60079-11, do kterých spadají izolační vzdálenosti mezi uvedenými obvody. Tabulka je vyplněna pouze pro vzdálenosti důležité pro jiskrovou bezpečnost.

Vzhledem k tomu, že obvody kromě měření pozistoru, izolačního stavu a celistvosti jsem nenavrhol jako bezporuchové, uvažuji u nich maximální možné napájecí napětí. Číslo 1 u obvodů v tabulce značí část před ochranami, číslo 2 značí část obvodu za ochranami.

Napětí do [V]	Ostatní	Pozistor 1	Pozistor 2	Izol. stav 1	Izol. stav 2	Celistvost 1
Pozistor 1	190					
Pozistor 2	190	30				
Izol. stav 1	190	60	30			
Izol. stav 2	190	60	30	30		
Celistvost 1	190	60	30	60	60	
Celistvost 2	190	60	30	60	60	30

Tabulka 8 - Kategorie izolačních vzdáleností mezi obvody dle tabulky č. 5 normy [3]

Hodnoty v tabulce jsem vypočítal například mezi „Celistvost 1“ a „Izol. stav 2“ jako součet napětí za ochranami obvodu pro měření izolačního stavu a jmenovitého napájecího napětí obvodu pro měření celistvosti, tedy 18 V + 24 V. Toto napětí spadá do kategorie do 60 V.

Z tabulky č. 5 normy jsem vybral konkrétní izolační vzdálenosti pro jiskrovou bezpečnost v úrovni „ia“, které jsem při návrhu DPS musel dodržet. Pro vzdálenosti mezi cestami ošetřenými nepájivou maskou platí vzdálenost pod nátěrem. Mezi jednotlivými vrstvami desky plošných spojů platí vzdálenosti přes pevnou izolaci.

Při návrhu dále předpokládám, že bude celá deska ošetřena ochranným nátěrem.

Vzdálenost [mm] Napětí [V]	vzdušná	pevná izolace	povrchová	pod nátěrem
30	2,0	0,5	2,0	0,7
60	3,0	0,5	3,0	1,0
190	5,0	0,8	8,0	2,6

Tabulka 9 - Vybrané izolační vzdálenosti z normy 60079-11 [3]

Návrhový program Eagle umožňuje rozdělení jednotlivých signálů schématu do tříd, pro které pak lze nastavit požadavek na izolační vzdálenost. V případě porušení těchto hodnot je při kontrole vyhodnocena chyba návrhu. Tato pomůcka však nedokáže rozlišit mezi různými druhy izolačních vzdáleností. Využil jsem ji tedy alespoň pro kontrolu vzdáleností pod nátěrem. Zbytek jsem kontroloval sám.

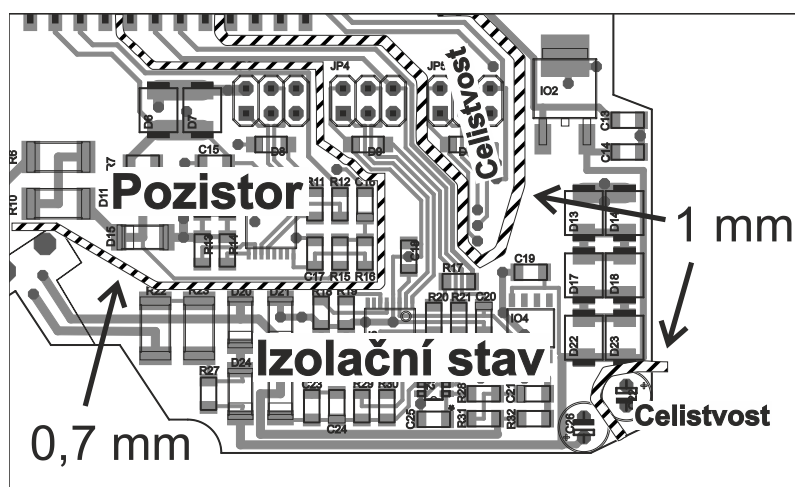
7.2.2 Konkrétní příklady konstrukčních řešení

Situací, kde jsem musel promýšlet izolační vzdálenosti a jiná konstrukční řešení, bylo při návrhu DPS opravdu mnoho, proto se pokusím popsat jen ty nejtýpější příklady.

Jiskrová bezpečnost

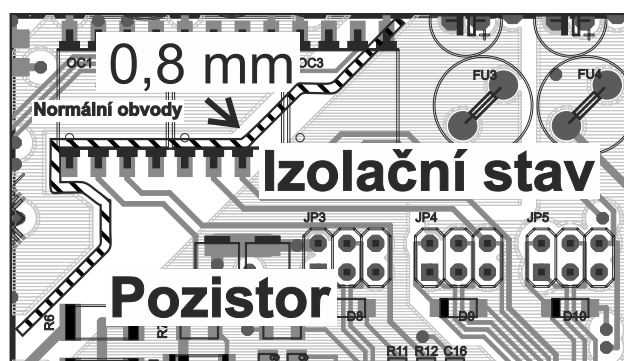
Jak jsem již zmínil dříve, norma ČSN EN 60079-11 stanovuje požadavky na izolační vzdálenosti, vybrané příklady jsem znázornil na obrázcích.

Na následujícím obrázku jsou vyznačeny izolační vzdálenosti mezi jiskrově bezpečnými obvody. V těchto případech se jedná o izolační vzdálenosti pod nátěrem (osazená deska bude lakována).



Obrázek 34 - Znárodnění některých izolačních vzdáleností

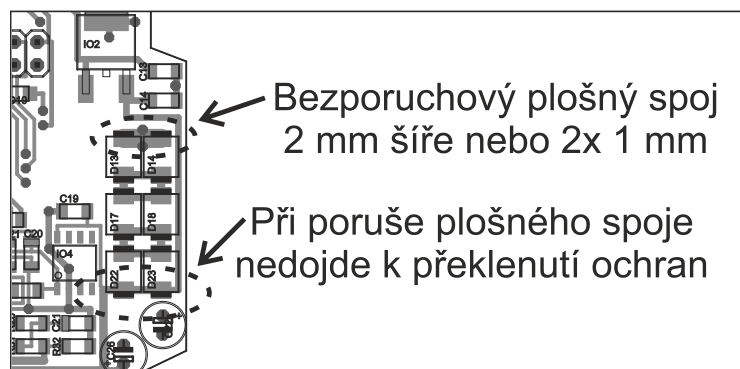
Řešil jsem také situaci, kdy se v sousedních vrstvách překrývaly jiskrově bezpečné obvody s plošnými rozvody napájení normálních obvodů. Vzhledem k tomu, že jsem zvolil konfiguraci vrstev plošného spoje o tloušťkách 0,38/0,7/0,38 mm, musel jsem s napájecím rozvodem ustoupit. V tomto případě se jednalo o vzdálenost přes pevnou izolaci.



Obrázek 35 - Znárodnění izolační vzdálenosti přes pevnou izolaci

Norma však stanovuje i jiné požadavky na konstrukci. Příkladem může být zapojení paralelních napěťových ochran (Zenerových diod) takovým způsobem, aby v případě

poruchy plošného spoje nemohlo dojít k jejich vyřazení a prostupu nebezpečných napětí na výstup. Příklad takového zapojení je na obrázku.



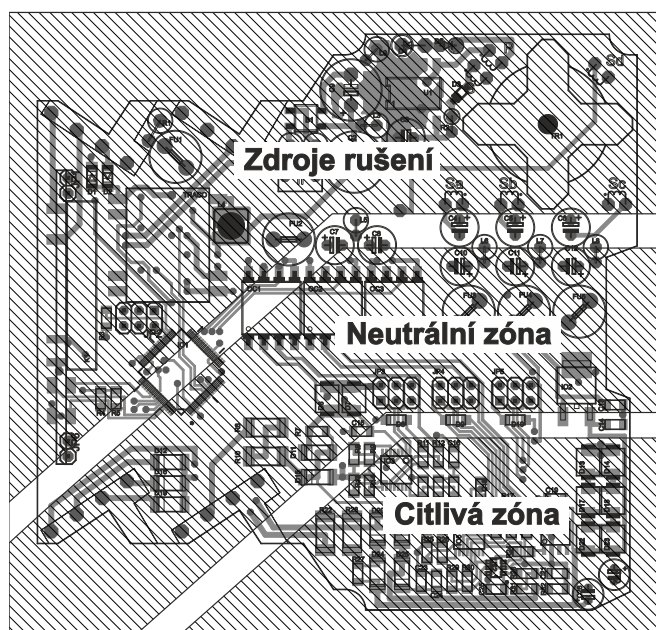
Obrázek 36 - Znázornění bezpečnostního vedení plošných spojů

Zásady pro minimalizaci vlivu rušivých napětí

Pro potlačení vlivu rušení jsem využil rozsáhlých zemních ploch ve skrytých vrstvách desky plošných spojů. Tyto plochy slouží jako stínění a zároveň minimalizují vznik parazitních napětí na napájecích vodičích vlivem jejich elektrického odporu.

V případě měřicích obvodů, které jsou rozmístěny na protilehlých vrstvách, jsem do skrytých vrstev umístil pouze zem každého z obvodů. V případě řídicího mikrokontroléru a komunikace CAN jsem nebyl takto omezen a skryté vrstvy jsem využil také pro rozvod kladného napětí.

Kromě těchto skutečností jsem jednotlivé komponenty rozmístil na desku do imaginárních oblastí tak, aby byla maximalizována vzdálenost mezi potenciálními zdroji rušení a citlivými obvody.



Obrázek 37 - Znázornění rozmístění komponent s ohledem na rušení

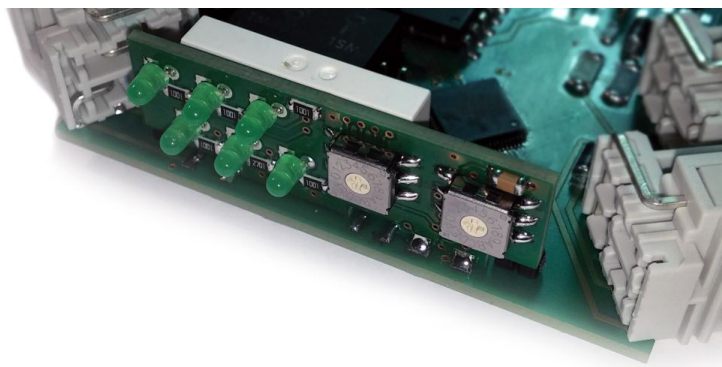
Problémy s nedostatkem místa

Na začátku kapitoly jsem zmínil, že jsem si stanovil za cíl navrhnout zařízení tak, aby se vešlo do zmíněné krabičky. Před samotným návrhem se však jen těžce odhaduje prostor, který obvody nakonec zaberou.

Kompletní elektrické schéma zařízení obsahuje přibližně 250 součástek. Před návrhem jsem měl k dispozici výrobek s přibližně 150 součástkami určený pro shodný typ krabičky. Vzhledem k tomu, že jsem u tohoto výrobku viděl jisté prostorové rezervy, věřil jsem, že se mi cíl podaří splnit.

Navrhované zařízení však na rozdíl od ukázkového obsahuje spoustu oddělených obvodů, které jsou navíc zatíženy požadavky na izolační vzdálenost. Minimalizaci rozměrů mi částečně usnadnilo využití čtyřvrstvé DPS, ani to však nestačilo.

Nakonec jsem vymyslel řešení, které problém s místem vyřešilo. Ovládací prvky a signálky jsem umístil na samostatnou desku spolu s expandérem vstupně/výstupních obvodů, který lze ovládat a vyčítat pomocí sběrnice I²C. Deska je uchycena pájenými spoji ke kolíkovým konektorům na hlavní desce. Elektrické signály jsou propojeny přes pájecí plošky na okrajích desky.



Obrázek 38 - Pohled na čelní panel

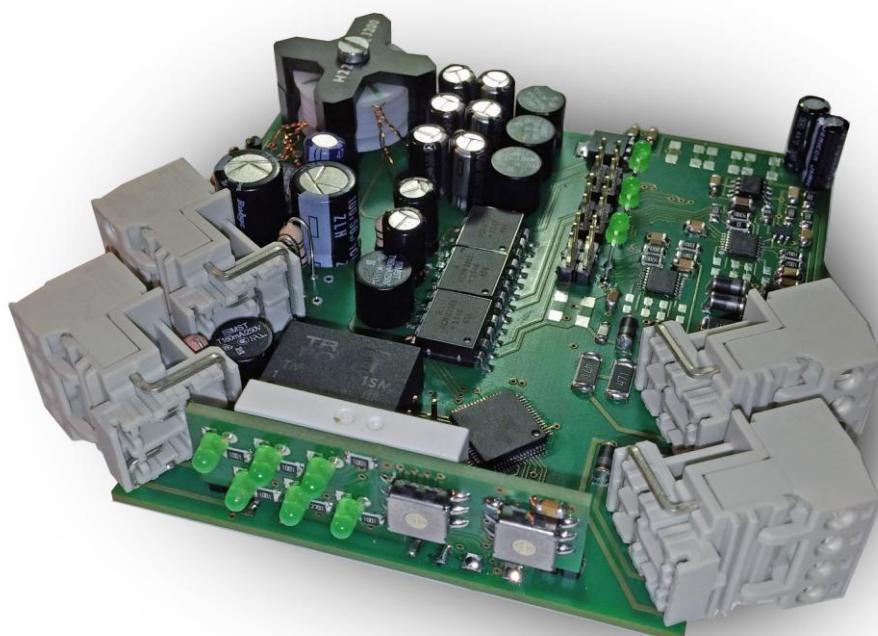
7.3 Návrh štítků

Jak jsem již zmínil dříve, označení a tedy i štítky jsou nezbytnou součástí zařízení. Čelní štítek bude obsahovat logo výrobce, typové označení a popisky signálů a ovládacích prvků. Na boční stěny krabičky pak budou umístěny parametry zařízení a vzorce dle směrnice ATEX, které jsem odvodil dříve. V budoucnu zde bude dále uvedeno číslo certifikátu

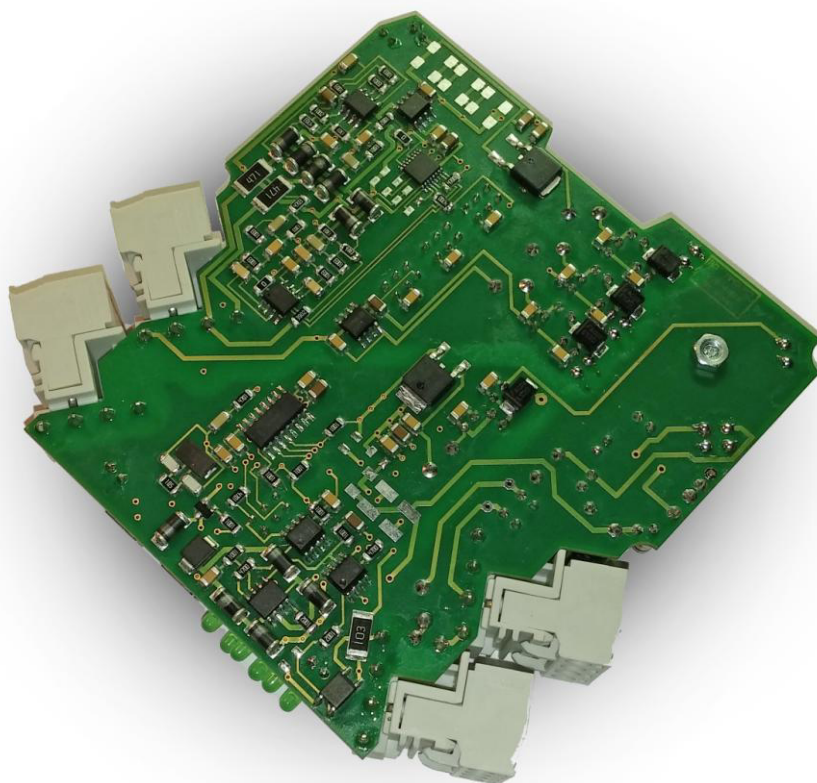
7.4 Fotografie výrobku



Obrázek 39 - Fotografie hotového výrobku



Obrázek 40 - Fotografie osazené desky - vrchní strana



Obrázek 41 - Fotografie osazené desky - spodní strana

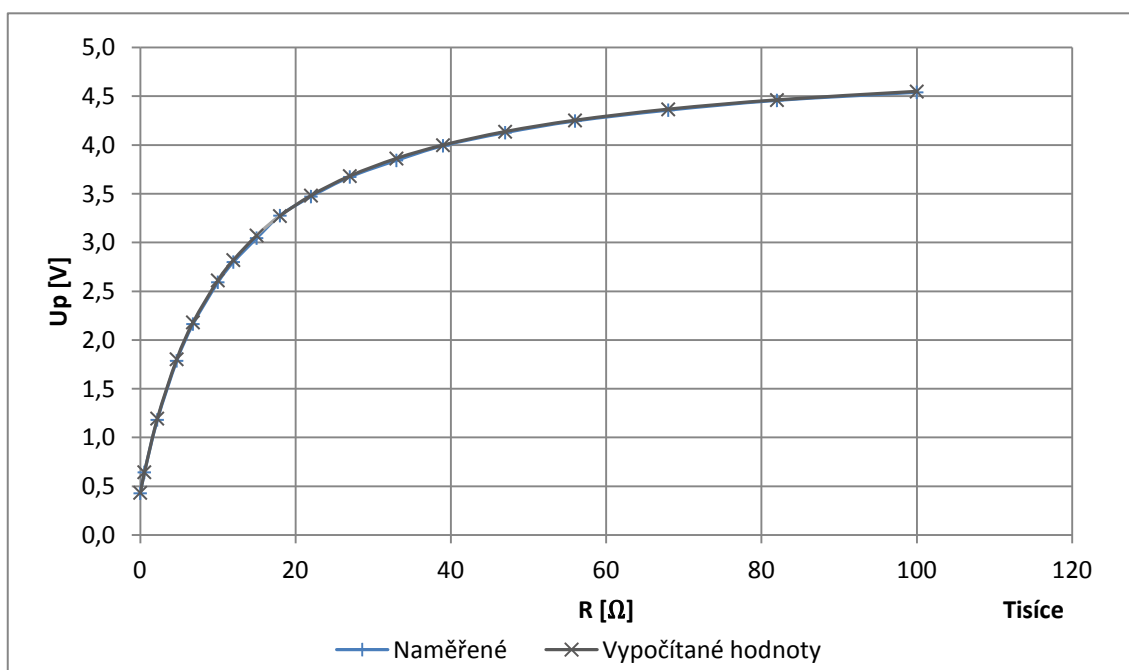
8 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

Po sestavení zařízení, vytvoření softwaru a jeho nahrání jsem přistoupil k testování funkčnosti. Prvním modulem, který jsem testoval, byl modul pro měření pozistoru. Naměřená data naprosto neodpovídala skutečnosti. Při hledání problému jsem vyčerpал všechny možnosti, posledním pokusem byla záměna desky. Díky tomu jsem zjistil, že problém spočíval ve vadném A/D převodníku mikrokontroléru. Vzhledem k tomu, že jsem zařízení dokončil krátce před termínem odevzdání práce, tato kapitola obsahuje pouze základní měření potvrzující funkčnost jednotlivých modulů.

Měření jsem prováděl připojením měřeného odporu nebo diody k aktivním vstupům jednotlivých modulů. Data jsem pak vyčítal pomocí převodníku UART na USB a terminálu RealTerm na počítači.

8.1 Modul pro měření pozistoru

Pro testování tohoto modulu jsem využil rezistory pevných hodnot 0 - 100 kΩ, které jsem připojoval ke vstupním svorkám. Graf znázorňuje kromě naměřených hodnot také hodnoty vypočítané. Jak lze vidět, naměřené hodnoty se téměř neliší od teoretických.



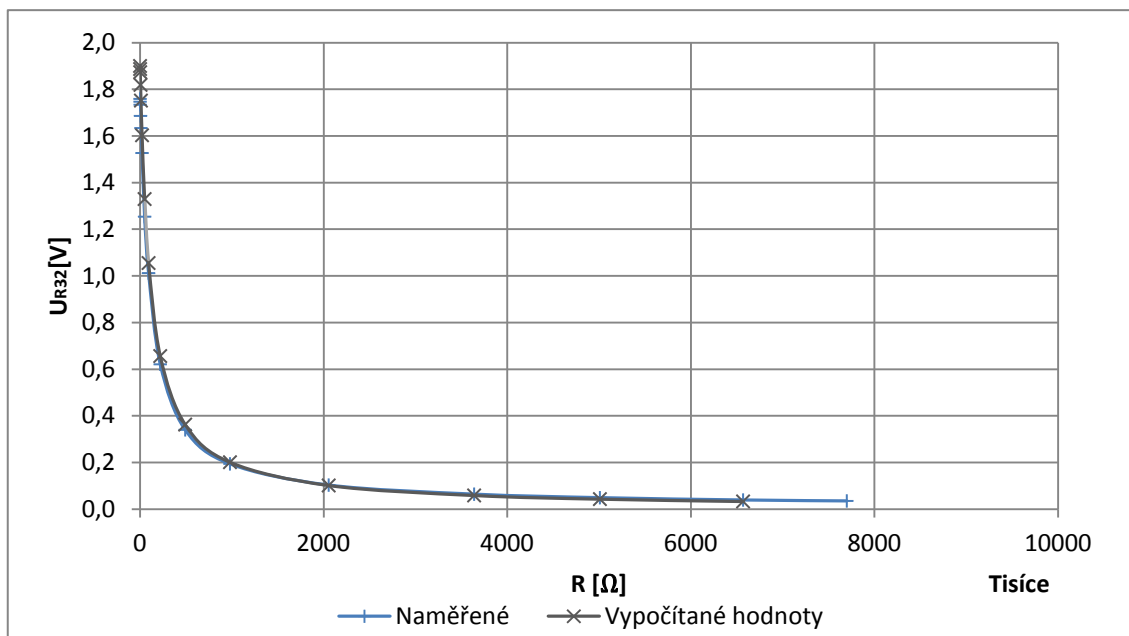
Graf 2 - Ověření funkčnosti modulu pro měření pozistoru

Teoretické hodnoty jsou vyjádřeny vztahem:

$$U_p = U_{refAD} \frac{R_Z + R_{R10} + R_{R6}}{R_Z + R_{R10} + R_{R6} + R_{R7}} \quad (17)$$

8.2 Modul pro měření izolačního stavu

Při testování modulu pro měření izolačního stavu jsem využil dvou trimrů jmenovité hodnoty 4,7 M Ω zapojených jako reostatů do série. Hodnotu nastaveného odporu jsem před připojením modulu ověřil kalibrovaným multimetrem Escort 97. Do grafu jsem vynesl sadu několika hodnot, které prokazují funkčnost tohoto modulu.

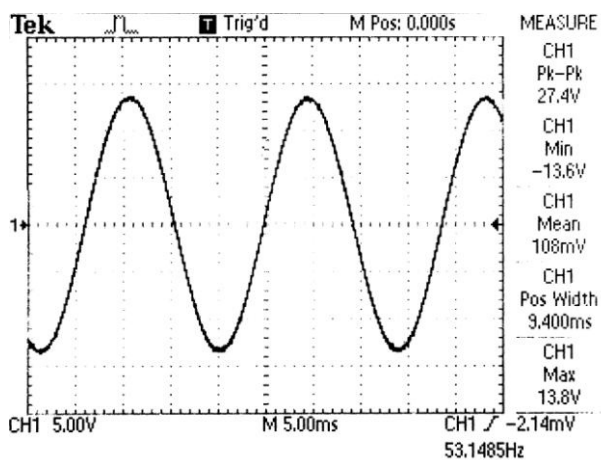


Graf 3 - Ověření funkčnosti modulu pro měření izolačního stavu

8.3 Modul pro měření celistvosti

U tohoto modulu jsem z nedostatku času pouze ověřil možnost detekce směru zařazené diody, detekci zkratu a rozpojeného obvodu a detekci přítomnosti cizího napětí.

Pro toto měření je důležitá funkce generátoru harmonického napětí, tu jsem ověřil pomocí osciloskopu. Přepočítání hodnot na odpor se mi zatím nepodařilo zprovoznit.



Obrázek 42 - Snímek osciloskopu měřícího generovaný signál

9 ZÁVĚR

Předmětem této práce bylo splnění zadání předloženého společností T Machinery a.s. na návrh jiskrově bezpečného analyzátoru vedení. Na začátku této práce jsem čtenáře seznámil teorií potřebnou pro pochopení obsahu této práce. Nejdříve jsem stručně shrnul teorii nevýbušných zařízení a vysvětlil princip ochrany proti výbuchu pomocí jiskrové bezpečnosti. Popsal jsem použité komunikační protokoly a sběrnice.

V rámci diplomové práce jsem dále ve spolupráci se zadavatelem práce promyslel a vytvořil hlavní koncepci navrhovaného zařízení pro měření veličin na vedení v prostorách s nebezpečím výbuchu. Vytvořil jsem bloková schémata, na kterých jsem podrobně popsal funkci jednotlivých měřicích modulů a jejich částí. Po tomto rozboru jsem navrhl elektrické schéma pro každý z modulů a stanovil parametry použitých součástek tak, aby vyhovovaly normám pro jiskrovou bezpečnost typu „ia“.

Pro zařízení jsem navrhnul desku plošných spojů a vytvořil testovací software.

Pro vývoj softwaru jsem se rozhodl využít systému Processor Expert, který by měl usnadnit vývoj díky již implementovaným inicializačním a ovládacím funkcím pro zvolený mikrokontrolér. Ve skutečnosti jsem se však často potýkal s problémy, kdy použitá funkce prováděla určité úkony, které byly v konfliktu s mými algoritmy a způsobily tak výrazné časové ztráty. Je tedy zapotřebí důkladně prověřovat obsah použitých funkcí. Nejednou se mi také přihodilo, že vygenerovaný kód obsahoval chybu, kterou nebylo možné odhalit. Taková chyba pak zmizela po přepnutí některého z parametrů určité komponenty z jedné hodnoty na druhou a zpět. Prokazatelně se tedy jednalo o chybu způsobenou nedokonalým generováním kódu.

V průběhu práce jsem byl konfrontován s různými problémy z širokého spektra technických odvětví. Při návrhu elektrického schématu jsem řešil problémy z oblasti mikroelektroniky s ohledem na dodržování technických norem. Při návrhu desky plošných spojů jsem řešil problémy z oblasti konstrukce elektronických zařízení, přičemž jsem byl opět konfrontován s požadavky norem na izolační vzdálenosti a problematikou minimalizace rušivých vlivů. Při návrhu testovacího softwaru jsem pracoval s komunikačními sběrnici a implementoval jsem například softwarovou FIFO paměť, kterou jsem využil při odesílání zpráv po sběrnici I²C.

Dále jsem navrhnout označení zařízení a stanovit jeho bezpečnostní parametry.

Zařízení se mi podařilo zkompletovat a zprovoznit do takového stavu, ve kterém je možné testovat jeho funkce a pokračovat ve vývoji softwaru. Vzhledem k tomu, že jsem byl při dokončování práce ve značné časové tísní, nebyl jsem schopen provést detailní měření na celém měřeném rozsahu. Situaci nepomohlo ani to, že jsem dlouho hledal chybu v programu, nakonec se však ukázalo, že se chyba byla způsobena vadným kusem mikrokontroléru. Provedl jsem tak jen dílčí měření, na kterých jsem ověřil funkčnost zařízení.

Práci jsem průběžně konzultoval se zadavatelem a v té souvislosti upravoval zařízení tak, aby vyhovovalo jeho představám. Požadavky zadavatele se mi podařilo splnit.

10 ZDROJE

- [1] ČSN EN 50303. Zařízení skupiny I, kategorie M1, určená pro použití za přítomnosti methanu a/nebo hořlavého prachu. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2001, 20 s.
- [2] ČSN EN 60079-0. *Výbušné atmosféry: Část 0: Zařízení - Všeobecné požadavky*. 3. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 92 s.
- [3] ČSN EN 60079-11. *Výbušné atmosféry: Část 11: Ochrana zařízení jiskrovou bezpečností "i"*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 132 s.
- [4] *Design-In Recommendations For PCT's: Document Number: 29009* [online]. 2005-12-5 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/29009/designin.pdf>
- [5] CHEN, Wai-Kai. *Passive, active, and digital filters*. Boca Raton, FL: CRC Press, c2009. ISBN 1420058851.
- [6] I2C-bus specification and user manual [online]. In: NXP SEMICONDUCTORS N.V. 2014, 4.5.2014 [cit. 2016-04-20]. UM10204. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf
- [7] JURA, Pavel. *Signály a systémy: Část 2: Spojité systémy*. 2. Brno, 2010, 78 s.
- [8] JURKOVIČ, K. *Príručka nízkofrekvenčnej obvodovej techniky*. Bratislava: Alfa, 1985, 683 s. ISBN 63-041-85.
- [9] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-02-3.
- [10] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 397 s. ISBN 80-7300-031-8.
- [11] LANCASTER, Don. *Active-filter cookbook*. Indianapolis: H. W. Sams, 1975. ISBN 0672211688.
- [12] MICROSEMI CORPORATION. 1N5333B thru 1N5388B Silicon 5 watt zener diodes. 2012, 5 s. Dostupné z: http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/5850-1n5333b-88b-pdf
- [13] ON SEMICONDUCTOR. MC78M00, MC78M00A Series: 500 mA Positive Voltage Regulators. 2015, 15 s. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC78M00-D.PDF
- [14] PACTITIS, S.A. *Active Filters: Theory and Design*. 20130916. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 9781420054774.

- [15] PAZUL, Keith. *AN713: Controller Area Network (CAN) Basics* [online]. In: MICROCHIP TECHNOLOGY INC. 1999, 03/14/2004 [cit. 2016-05-06].
Dostupné z:
<http://www.microchip.com/wwwAppNotes/AppNotes.aspx?appnote=en011694>
- [16] POHLUDKA, Jan a Jaromír HRUBÝ. *Elektrická zařízení v prostorech s nebezpečím výbuchu hořlavých plynů, par a prachů*. 2., aktualiz. vyd. Praha: IN-EL, 2013, 238 s. Elektro (IN-EL). ISBN 978-80-86230-87-0.
- [17] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 3. vyd. Praha: BEN, 1996, 467 s. ISBN 80-901984-3-0.
- [18] SCHURTER ELECTRONIC COMPONENTS. Non resettable fuses: MST 250. 2014, poslední aktualizace 8. 5. 2014, 4 s. Dostupné z:
http://www.schurter.ch/var/schurter/storage/ilcatalogue/files/document/datasheet/en/pdf/typ_MST_250.pdf
- [19] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2014/34/EU ze dne 26. února 2014, poslední aktualizace 29.3.2014. Dostupné z:
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0034>
- [20] STMICROELECTRONICS. LEXX: Very low-dropout voltage regulator with inhibit function. 2014, 27 s. Dostupné z:
<http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/009/7824cv-dg-datasheet-1.pdf>
- [21] WURZEL, T. *Jiskrově bezpečný zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D..
- [22] ZEŽULKA, František, Petr FIEDLER, Petr VAŇOUS a Petr CACH. *Průmyslové komunikační sítě*. Brno, 2000, 70 s.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

C_O	Parametr povolené připojené kapacity z hlediska jiskrové bezpečnosti
$I_{n_{max}}$	Maximální povolená nominální hodnota pojistky v daném kontextu
I_F	Maximální uvažovaný proud pojistkou při aplikaci bezpečnostního koeficientu 1,7
I_O	Parametr výstupního proudu z hlediska jiskrové bezpečnosti
I_n	Nominální hodnota pojistky
I_p	Maximální přípustný proud pojistkou před uvážením bezpečnostních koeficientů v daném kontextu
L_O	Parametr povolené připojené indukčnosti z hlediska jiskrové bezpečnosti
$P_{Z_{max}}$	Maximální výkonová zatížitelnost Zenerovy diody s tolerancí 5 % a uvážením bezpečnostních koeficientů v daném kontextu
P_O	Parametr výstupního výkonu z hlediska jiskrové bezpečnosti
R_0	Elektrický odpor termistoru při 0 °C
$U_{Z_{max}}$	Maximální závěrné napětí Zenerovy diody s tolerancí 5 %
U_O	Parametr výstupního napětí z hlediska jiskrové bezpečnosti
U_p	Napětí na pozistoru
U_{refAD}	Referenční napětí A/D převodníku
U_Z	Závěrné napětí Zenerovy diody
U_{ZDm80}	Maximální přípustné závěrné napětí Zenerovy diody SMBJ53xxB při teplotě 80 °C a uvážení bezpečnostních koeficientů

SEZNAM PŘÍLOH

Osazovací plán – vrchní strana	A
Osazovací plán – spodní strana.....	B
Rozpis použitých součástí	C
Obsah CD.....	E

OSAZOVACÍ PLÁN – VRCHNÍ STRANA

UTAJENO

OSAZOVACÍ PLÁN – SPODNÍ STRANA

UTAJENO

ROZPIS POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

UTAJENO

UTAJENO

OBSAH CD

- **Plný text diplomové práce**
- **Podklady pro výrobu desky plošných spojů**
- **Výrobní dokumentace**
- **Štítky**
- **Zdrojové kódy ukázkových programů pro mikrokontroléry**
- **Fotografie výrobku**